

Магістерська дисертація

на тему: Система вимірювання положення центра ваги

Київ – 2019 року

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Приладобудівний
(повна назва інституту/факультету)

Приладобудування
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 531.24:531.75](043.3)

«До захисту допущено»
завідувач кафедри
_____ Ю. В. Киричук
(підпис) (ініціали, прізвище)
« 12 » грудня 2019 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістр**

зі спеціальності (спеціалізації) 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегро-
вані технології (комп'ютерно-інтегровані
технології проектування приладів)
(код і назва спеціальності)

на тему: Система вимірювання положення центра ваги

Виконав: студент 2 курсу, групи ПМ-81мп
(шифр групи)

Галузінський Олександр Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник старший викладач Зайцев В. М.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант Розробка СТАРТАП-проекту,
(назва розділу)

доцент, доктор економічних наук Бояринова К. О.
(посада, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент голов. констр. АТЗТ "УКРВЕСКОМ" Коломієць Ю. О.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет _____ Приладобудівний
(повна назва)

Кафедра _____ Приладобудування
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність(спеціалізація) 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (комп'ютерно - інтегровані технології проектування приладів)
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ М.Д. Гераїмчук
(підпис) (ініціали, прізвище)

« __ » _____ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

_____ Галузінському Олександр Миколайовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Система вимірювання положення центра ваги
науковий керівник магістерської дисертації Зайцев Віктор Миколайович,
старший викладач
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «07» листопада 2019 р. № 3848-с

2. Термін подання студентом дисертації 12 грудня 2019 р.

3. Перелік завдань, які необхідно розробити 1) Огляд та аналіз проблем вимірювання положення центра ваги, огляд систем вимірювання; 2) Математична модель аналізу вимірювальної системи, ідентифікації її параметрів та алгоритмів вимірювання; 3) Метрологічний аналіз характеристик системи; 4) Розробка програмного забезпечення автоматизації експерименту; 5) Експериментальні дослідження елементів та вимірювальної системи в цілому; 6) Висновки.

4. Перелік графічного (ілюстрованого) матеріалу 1) Система вимірювання положення центру ваги – 3 арк. ф. А1; 2) Лист математичної моделі

вимірювальної системи – 1 арк. ф. А1; 3) Принципова схема системи вимірювання – 1 арк. ф. А1; 4) Лист графічних характеристик та залежностей – 2 арк. ф. А1; Презентаційний лист – 1 арк. ф. А1.

5. Орієнтований перелік публікацій 1) Метрологічне забезпечення визначення центрів маси рухомих об'єктів; 2) Експериментальні дослідження вимірювальної системи положення центру ваги рухомих об'єктів.

6. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка стартап-проекту	Бояринова К. О., доцент, доктор економічних наук		

7. Дата видачі завдання 07 листопада 2019 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів дисертації	Примітка
1.	Аналіз проблем вимірювання положення центра ваги	20.09.2019	
2.	Розробка математичної моделі, алгоритму визначення положення центру ваги	04.10.2019	
3.	Проведення розрахунків системи	11.10.2019	
4.	Розробка програмного забезпечення	25.10.2019	
5.	Проведення експериментів	01.11.2019	
6.	Розробка стартап-проекту	06.11.2019	
7.	Розробка графічної частини дисертації	22.11.2019	
8.	Оформлення пояснювальної записки	09.12.2019	
9.	Представлення дисертації на перевірку науковому керівнику	10.12.2019	
10.	Передача матеріалів дисертації на перевірку виявлення збігів/схожості текстів Unichesk	11.12.2019	
11.	Представлення дисертації на затвердження	12.12.2019	

Студент

(підпис)

О. М. Галузінський
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

В. М. Зайцев
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Актуальність

Основний потік вантажних перевезень припадає на залізницю, яка являється одним із важливих артерій сполучення Європи з Азією. Безпечне транспортування вантажів є головним завданням для країни. Більшість аварій на залізниці відбувається через недотримання правил перевезення вантажів внаслідок несиметричне завантаження вагонів. Таким чином це призводить до зміщення центру ваги, що призводить до появи повздовжніх та поперечних сили, що впливають на стійкість вагону. Тому пропонується розробити систему вимірювання положення центра ваги, з метою контролю дотримання правил.

Об'єктом дослідження даної роботи є вимірювальна система положення центра ваги рухомих об'єктів.

Предметом дослідження являється підвищення точності алгоритму визначення положення центру ваги.

Магістерська дисертація складається із пояснювальної записки, яка містить вступ, 4 основних розділи, список використаних джерел, 29 малюнків, 44 таблиць. Загальний обсяг складає 98 сторінок. Та графічної частини, що містить 2 аркуші ф. А1 графіків, 2 аркуші ф. А1 схем, 2 аркуші ф. А1 складальних креслень та 1 аркуш ф. А1 креслень деталей та презентаційний лист. Загальний обсяг графічної частини складає 8 аркушів формату А1.

Ключові слова: ваговимірювальна система, центр ваги.

					МД ПМ81.000.00 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата	Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Аркушів	
Розроб.		Галцзінський							
Перевір.							5	98	
Реценз.						ПБФ. ПМ-81мп			
Н. Кантр.									
Затверд.		Зайцев							

SUMMARY

Actual continuity

The main stream of freight traffic is performed by railways one of the most important through passages from Europe to Asia. Safe transportation of freight is a main task for our country. Most rail way accidents occur as a result of not following freight transportation rules because of non-symmetric loading of freight wagons.

Thus, it leads to center of gravity shift resulting in appearances of longitudinal and transversal forces having an impact on sturdiness of a carriage. It is proposed to develop a measurement system of weight center position with the aim of monitoring following the rules.

The object of the study of this project is a measurement system of weight center position of moving objects.

The subject of the study is improvement of algorithm precision to evaluate center weight position.

The master`s thesis consists of an explanatory note containing introduction, 4 main sections, a list of used sources, 29 illustrations and 44 tables. The total number of pages is 98. And a graphic part contains 2 sheets of diagrams format A1, 2 sheets of schemes of format A1, 2 sheets of drawing format A1 and 1 sheet parts drawing of parts format A1 and a presentation letter. The total graphic part is 8 sheets format A1.

Key words: weight meter system, center weight.

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

Перелік термінів, умовних позначень, скорочень	9
ВСТУП	10
1. ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ВИЗНАЧЕННЯ ЦЕНТРІВ МАС РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ	11
1.1. Вплив повздовжнього та поперечного зміщення центру ваги у вантажних вагонах.....	11
1.2. Математичне моделювання навантаження колісної пари вагону	16
1.3. Аналіз способів та засобів визначення центра мас.....	27
2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ	31
2.1 Опис системи вимірювання положення центру ваги	32
2.2. Задача аналізу.	33
2.3. Задача вимірювання.	33
2.4. Задача калібрування	34
2.5. Чисельне представлення роботи алгоритму	37
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ.....	45
3.1. Вибір засобів вимірювання	45
3.2. Опис програми для проведення експерименту	52
3.3. Градування датчиків	54
3.4. Розрахунок похибок датчика	67
3.5. Ідентифікація (калібрування) системи.....	68
3.6. Проведення вимірювання за розробленим алгоритму	71
3.7. Оцінка адекватності розробленої математичної моделі за результатами дослідження	73
4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	75
4.1. Опис ідеї проекту	75
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	76
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	77
4.4. Розробка ринкової стратегії проекту.....	82
4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	84
Висновки	87
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	89

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 90

Додатки

Додаток А..... 94

Перелік термінів, умовних позначень, скорочень

ЦВ – центр ваги;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

I_{Cx} – сила інерції Коріоліса;

$F_{rв,y}$ – сила аеродинамічного опору, що впливає поперек вагона;

θ – кут нахилу осі колісних пар;

η – кут нахилу кузова вагона в бік внутрішньої рейкової нитки;

ζ – кут нахилу кузова вагона в бік зовнішньої рейкової нитки через зміщення загального центру мас вантажу поперек вагона;

G – вага;

l – довжина;

R – перетворення навантаження;

xM , yM – зміщення центру ваги вантажу щодо поперечної та повздовжньої осі симетрії вагону;

h_o – висота загального центру мас вантажів над підлогою вагона;

h_c – висота загального центру мас системи над підлогою вагона;

M_o – маса вантажу;

F – сила навантаження;

g – прискорення вільного падіння.

X_i , Y_i – координати тензодатчиків де $i = 1 \dots 4$;

X_{ii} , Y_{ii} – координати прикладання тестового навантаження $i = 1 \dots 8$.

S_i – чутливість i -го перетворювача де $i = 1 \dots 4$;

K_{i0} – початковий вихідний код i -го перетворювача де $i = 1 \dots 8$;

K_{ij} – вихідний код i -го перетворювача при j -ом навантаженні де $i = 1 \dots 8$, $j = 1 \dots 4$.

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Поряд із вимірюванням маси сьогодні постає ще один не менш важливий параметр – це положення центра ваги.

Відомі нормативно-технічні вимоги для літаків, залізничного та автомобільного транспорту. Проаналізувавши їх можна винести одну найбільш важливу вимогу – це точне визначення ваги та центра ваги. Положення центра ваги є дуже важливими та має піддаватися постійному контролю в рухомому об'єкті.

Оскільки залізничний транспорт у наш час широко використовують для перевезення різних видів вантажів практично на будь-якому великому підприємстві, тому украй важливо створити умови для безпечного руху поїздів. Визначення зміщення центру ваги вантажу відносно осей симетрії залізничного вагона дозволяє оперативно виявляти небезпечні відхилення в його стійкості й тим самим істотно збільшити безпеку під час руху поїзда. Контроль зміщення центру ваги дозволить підвищити швидкість перевезення вантажів залізничним шляхами України, а також підвищить експлуатаційний строк колійного господарства залізниці. Таким чином впровадження контролю зміщення центру ваги підвищить ефективність роботи залізниці, що вплине позитивно на економіку країни.

На сьогоднішній день порядок із розрахунковими все більше розповсюдженими стають вимірювальні методи, що володіють більш високою точністю та достовірністю.

Головну роль у вимірювальному методі відіграє тензодатчик він, як правило володіє високою точністю. Після вимірювання складових ваги здійснюється обрахунок за методами, що наведено у нормативно-технічних документах вручну або автоматично на комп'ютері.

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		

1. ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ВИЗНАЧЕННЯ ЦЕНТРІВ МАС РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ

Залізничний транспорт відіграє головну роль у перевезенні вантажів Україною, що має значний вплив на економіку. Тому забезпечення безпеки руху вантажних локомотивів є одним із головних задач. Визначення зміщення центру ваги вантажу відносно осей симетрії залізничного вагона дозволяє оперативно виявляти небезпечні відхилення в його стійкості й тим самим істотно збільшити безпеку під час руху поїзда. Останнім часом це питання стає особливо актуальним у зв'язку з підвищенням вимог залізниці до допустимих значень поздовжнього та поперечного зміщення вантажу під час завантаження вагона " " " "]15, 29].

1.1. Вплив поздовжнього та поперечного зміщення центру ваги у вантажних вагонах

Як відомо, під час руху вагона в складі поїзда по кривих ділянках колії на сили взаємодії коліс із рейками безпосередній вплив мають поперечні сили, які виникають від дії поздовжніх сил в автозчепленнях вагона в режимах тяги на зтяжних ухилах і під час гальмувань, особливо рекуперативних [15].

На рис. 1.1 зображено, як діють на вагон сили з боку інших вагонів, розташованих попереду й позаду нього по ходу руху поїзда.

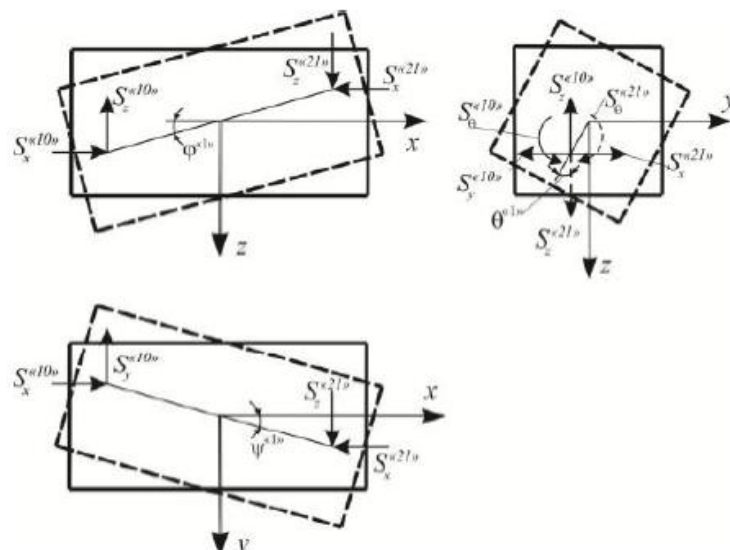


Рис. 1.1 – Дія на вагон сил із боку сусідніх вагонів

Рухаючись по кривій, вагон під дією поздовжніх сил в автозчепленнях може зайняти різне положення відносно осі колії, що значною мірою впливає

на величини бічних горизонтальних сил взаємодії й сили тертя коліс із рейками. У режимі гальмування сили стиснення можуть сприяти розташуванню вагонів у колії «ялинкою», що призводить до збільшення кутів набігання коліс на рейки. Доповнення математичних моделей просторових коливань вихідними даними з уточненими інерційними характеристиками елементів вагонів і вантажів дозволяє наблизити результати розрахунків до реального стану об'єктів і тим самим підвищити об'єктивність математичного та комп'ютерного моделювання [15].

Як було зазначено вище, безпека руху поїздів і збереження вантажів, які перевозять, безпосередньо залежать від способу їх розміщення й кріплення.

Особливу увагу приділяють центру ваги. Для стійкості й безпеки транспортування центр ваги повинен бути на перетині центральних поздовжніх і поперечних ліній. Якщо потрібно перевезти нестандартний вантаж, то можливе незначне зміщення центру ваги. Крім того, у процесі перевезення вантажів іноді виникає необхідність у несиметричному розташуванні їх у вагоні. Зсув вантажу відносно центру ваги вагона можливий і під час транспортування. Часто потрібно оцінити вплив такої несиметричності на динамічні якості вагона та встановити допустимі величини зсуву вантажів (рис. 1.2) [15].

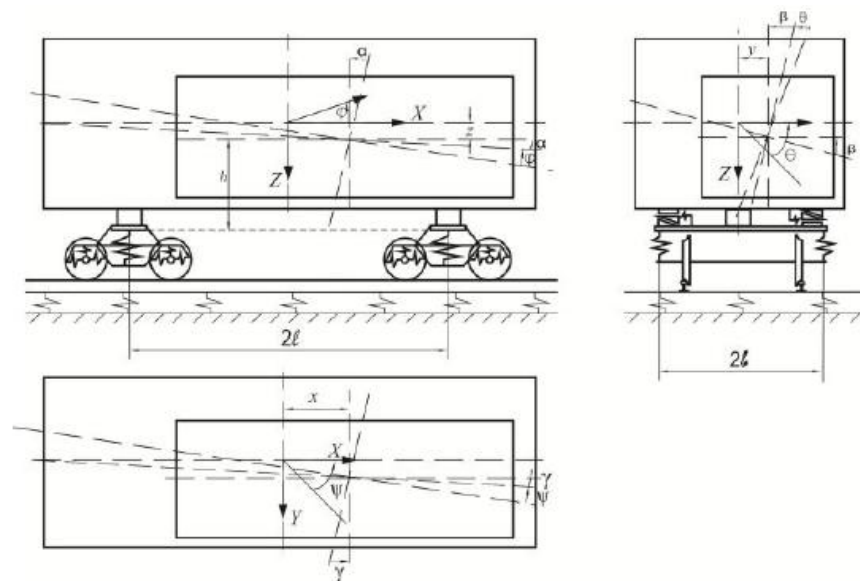


Рис. 1.2 – Розрахункова схема 4-вісного вагона з несиметричним розташуванням вантажу

Зазвичай у разі симетричного завантаження кузова вагона в розрахунковій схемі приймають, що головні центральні осі інерції співпадають з осями його симетрії. Якщо прийняти, що в розрахунковій схемі вагона з несиметричним завантаженням кузова розташування осей координат співпадає з осями симетрії кузова, то інерційні властивості його можна виразити через моменти інерції відносно трьох перпендикулярних осей і відповідні цим осям відцентрові моменти інерції. У кожному з варіантів завантаження кузова розташування початку координат прийнято в центрі ваги. Головні осі інерції при цьому співпадають з осями симетрії еліпсоїда інерції, напрямки яких визначають косинусами трьох кутів α , β , γ . Математична модель дозволяє розглянути коливання вагона з несиметричним розміщенням вантажу й різними жорсткостями ресорного підвішування [15].

Загальний центр ваги вантажів ($\text{ЦВ}_в^3$) повинен розміщуватися, як правило, на лінії перетину поздовжньої та поперечної площин симетрії вагона. У випадках, коли ця вимога нездійсненна з об'єктивних причин (геометричні параметри вантажу, умови розміщення та кріплення), допускається зміщення $\text{ЦВ}_в^3$ відносно поздовжньої та поперечної площин симетрії вагона (табл. 1.1).

Допустиму величину зміщення $\text{ЦВ}_в^3$ у поздовжньому напрямку $l_{зм}$ (відносно поперечної площини симетрії) під час завантаження вантажу й на шляху прямовання визначають відповідно до табл. 1.1 залежно від загальної маси вантажу у вагоні [15].

Відповідно до Вимоги до міцності та динамічних якостей (ГОСТ 33211-2014, IDT). в разі необхідності несиметричного розташування вантажу у вагоні різниця в завантаженні візків не повинна перевищувати: для 4-вісних вагонів – 10 т; 6-вісних – 15 т; 8-вісних – 20 т. При цьому навантаження, що припадає на кожен із візків, повинно бути не більше за половину вантажопідйомності вагона [15].

Допустиму величину зміщення $\text{ЦВ}_в^3$ у поперечному напрямку $b_{зм}$ (відносно поздовжньої площини симетрії) під час завантаження вантажу й на шляху прямовання визначають відповідно до табл. 1.2 залежно від загальної

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

маси вантажу у вагоні й висоти загального центру ваги вагона з вантажем ($H_{\text{цв}}^3$) над рівнем верху головок рейок [15].

Таблиця 1.1 – Допустиме поздовжнє зміщення загального центру ваги вантажу в 4-вісному вагоні

Вага вантажу, т	$l_{\text{зм}}$, мм	
	Під час завантаження	На шляху прямуювання
≤10	2700	3000
15	2250	2480
20	1950	2160
25	1550	1730
30	1250	1440
35	1100	1235
40	950	1080
45	850	960
50	750	865
55	680	785
60	600	720
62	550	630
67	200	260
70	0	60
>70	0	0

Допускається одночасне зміщення ЦВ_B^3 відносно поздовжньої та поперечної площин симетрії вагона (рис. 3) в межах значень, поданих у табл. 1. 2 [15].

Допускається перевезення двох вантажів (або груп вантажів) однакової маси з кососиметричним розміщенням їх у вагоні (рис. 1.4) у разі дотримання таких умов:

– висота загального центру ваги вагона з вантажем ($H_{\text{цв}}^3$) над РГР не перевищує 2 300 мм;

- відстані між центрами ваги вантажів $\text{ЦВ}_{в1}$ та $\text{ЦВ}_{в2}$ у поздовжньому та поперечному напрямках не перевищують допустимих значень, які визначають відповідно до табл. 3 з урахуванням загальної маси вантажів;
- $\text{ЦВ}_в^3$ знаходиться на перетині поздовжньої й поперечної площин симетрії вагона [15].

Таблиця 1.2 – Допустиме поперечне зміщення загального центру ваги вантажу в 4-вісному вагоні

Вага вантажу, т	Висота загального ЦВ вагона з вантажем над РГР, м	$b_{зм}$, мм	
		Під час завантаження	На шляху прямування
≤ 10	$\leq 1,2$	450	620
	1,5	380	550
	2,0	290	410
30	$< 1,2$	380	550
	1,5	310	450
	2,0	250	350
	2,3	200	280
50	$\leq 1,2$	250	350
	1,5	200	280
	2,0	180	250
	2,3	140	200
55	$\leq 1,5$	150	220
	2,0	120	170
	2,3	100	150
67	$\leq 1,5$	125	180
	2,0	95	140
	2,3	80	120
> 67	$\leq 2,3$	70	100

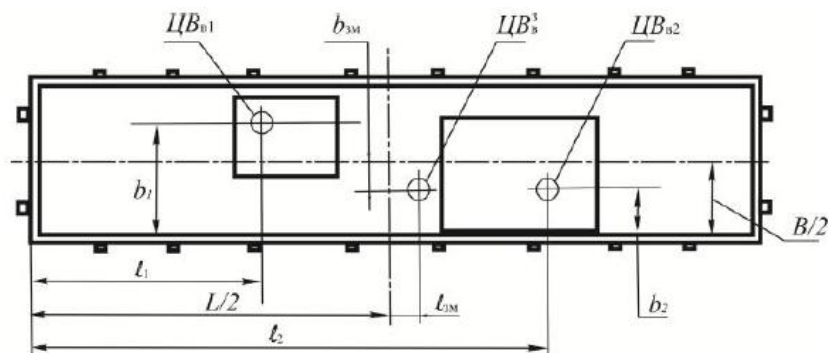


Рис. 1.3 – Розрахункова схема визначення поздовжнього та поперечного зміщень загального центру ваги вантажів у вагоні

Сумарна маса вантажу й засобів кріплення у вагоні не повинна перевищувати його трафаретної вантажопідйомності, а в разі завантаження вантажу з обпиранням на два вагони частка маси вантажу й засобів кріплення, що припадає на кожний вантажонесний вагон зчепу, не повинна перевищувати трафаретної вантажопідйомності вагона [15].

Таблиця 1.3 – Максимально допустимі відстані між центрами ваги вантажів із кососиметричним розміщенням їх у вагоні

Загальна вага двох вантажів	l , мм	b , мм
≤ 20	8000	1250
30	7000	900
40	6000	750
50	6000	600
55	6000	500
67	5000	400
72	4500	350

Вихід вантажу в поздовжньому напрямку за межі кінцевих балок рами платформи або піввагона не повинен перевищувати 400 мм [15].

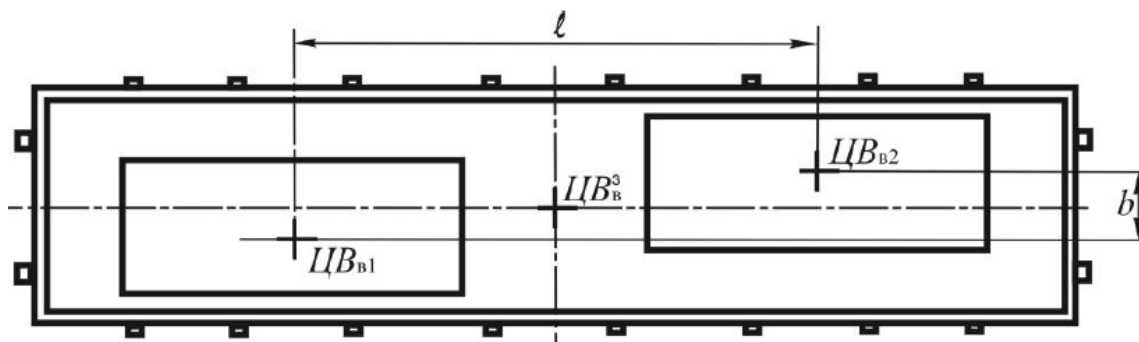


Рис. 1.4 – Розрахункова схема визначення поздовжнього та поперечного зміщень загального центру ваги вантажів у вагоні

1.2. Математичне моделювання навантаження колісної пари вагону

Як було сказано в попередньому розділі, що найбільшу небезпеку несе поперечне зміщення ваги вантажу, а також поздовжнє зміщення. Виходячи з цього, не вказано, яке з коліс візків може вкочується на опорний рейс, представляючи при цьому найбільшу небезпеку. В [2] за набігаюче на

поверхню кочення рейки колесо прийнято найменш навантажене вертикальними силами колесо, при яких воно має найгіршу стійкість на рейці. За набігання на поверхню кочення колесо, слід прийняти найменш навантажене просторовими силами колесо при одночасному зміщенні центру мас вантажу щодо осі симетрії вагона (за наявності x_M і y_M), при яких воно має найгіршу стійкість на рейці [26].

В [3] рамна сила H_p , як відома за величиною сила (за замовчуванням) і прикладена на шийку осі колісної пари, використана в рівняннях рівноваги сил в проекціях на поперечну і вертикальну осі, і моментів сил відносно точки контакту гребеня колеса на завзятий рейок (див. рівняння (6.128) - (6.130) в [7]), складених з метою оцінки стійкості проти вкочування гребеня колеса на рейку. Неточність визначення нормальних складових реакції зв'язків (рейок) N_1 і N_2 з складених рівнянь рівноваги сил і моментів сил (наприклад, з (6.129) і (6.130), замість (6.128) і (6.120)), які мають місце у всіх в подальшому опублікованих джерелах (див., наприклад, [4, 5]) відзначено в [6].

В [7] наведені аналітичні формули розрахункових навантажень для осей колісних пар в нерухомій системі координат. Розглянуто ідеальний випадок, коли колісні пари розташовані симетрично щодо поперечної і поздовжньої осі симетрії вагона, що рухається по ідеально рівному шляху. Для розрахункової схеми прикладання сил на колісну пару, відповідної руху вагона по прямій ділянці шляху, отримані аналітичні формули вертикальних сил, що сприймаються шийками осі колісної пари з урахуванням коефіцієнта динаміки у вертикальному напрямку f_z і відцентрової сили (як добуток коефіцієнта динаміки в поперечному напрямку на кут дії β_{Qc} (кут Фруда) бічного прискорення a_{Qc}) (див. (3) і (4), [7]). Тут облік відцентрової сили неприпустимий. Однак в [7] вперше зроблено спробу (нехай навіть невдала) аналітично описати розрахункові навантаження для осей колісних пар в нерухомій системі координат [26].

Таким чином, до цих пір залишається мало вивченим або зовсім не дослідженим вплив одночасного зміщення центру мас вантажу щодо осі

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

симетрії вагона при впливі просторової системи сил на шийки осі колісної пари з “набігаючим” на головку рейки колесом.

В [6] виведена аналітична формула для визначення горизонтальної поперечної динамічної сили у вигляді:

$$F_{кр.у} = I_{ey0} + I_{Cx} + F_{рв.у} \cos(\theta + \eta - \zeta) - G_0 \sin(\theta + \eta - \zeta) - F_{ас.у},$$

або

$$F_{кр.у} = k_{ey} G_0 + I_{Cx} + F_{рв.у} \cos(\theta + \eta - \zeta) - G_0 \sin(\theta + \eta - \zeta) - F_{ас.у}. \quad (1.1)$$

де I_{ey0} – поперечна переносна сили інерції; I_{Cx} – сила інерції Каріоліса, що з'являється при зсуві вантажу уздовж вагона [8]; $F_{рв.у}$ – сила аеродинамічного опору, що впливає поперек вагона; θ – кут нахилу осі колісних пар; η – кут нахилу кузова вагона в бік внутрішньої рейкової нитки; ζ – кут нахилу кузова вагона в бік зовнішньої рейкової нитки через зміщення загального центру мас вантажу поперек вагона; $F_{ас.у}$ – проекція сили, що виникає від впливу на вагон з вантажем автозчепних пристроїв суміжних вагонів, на поперечну вісь; $k_{д.у}$ – коефіцієнт, що враховує рух вагона з прискоренням в поперечному напрямку: $k_{д.у} = a_{ey}/g$, чисельно рівний, наприклад, $k_{д.у} = 0,3 - 0,46$; $G_0 = G + (G_T - G_{кпр})$ – загальна вага вагона з вантажем (або надресорної частини вагона), де G і G_m – сила тяжіння вантажу і тари вагона; $G_{кпр}$ – сила тяжіння всіх чотирьох колісних пар і бічних рам візків [26].

Силу інерції Каріоліса I_{Cx} в практичних розрахунках можна знехтувати через незначну її величини (становить менше 10% від ваги вантажу (наприклад, 700 кН) при швидкості руху поїзда 100 км/год) [8].

В окремому випадку, при русі вагона по прямій ділянці шляху (де $\theta = \eta = 0$, $F_{ас.у} = 0$) при наявності зміщення центру мас вантажу поперек вагона yM , прийнятого згідно ТУ залежно від ваги вантажу [9], в [6] отримана формула:

$$F_{пр.у} = I_{ey0} + F_{рв.у} \cos(-\zeta) - G_0 \sin(-\zeta),$$

або

$$F_{пр.у} = k_{ey} G_0 + F_{рв.у} \cos(-\zeta) - G_0 \sin(-\zeta), \quad (1.2)$$

або, при $yM = 0$,

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F_{\text{пр.у}} = k_{ey} G_0 + F_{\text{рв.у}} . \quad (1.3)$$

Таким чином, горизонтальна поперечна сила F_y , згідно [6], являє собою суму всіх поперечних сил, що сприймаються бічними рамами візків (як неідеальними та затримуючими зв'язками), через яких впливають на шийки осі всіх колісних пар вантажного вагона (рис. 1.5).

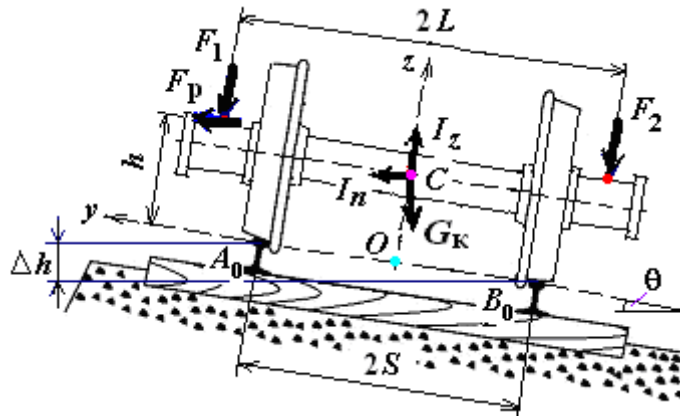


Рис. 1.5 – Схема прикладання сил до колісної пари вагона

На рис.1.5, як і в [6], позначені: G_k – вага колісної пари, кН; $F_1 = F_{D0}$ і $F_2 = F_{B0}$ – що підлягає визначенню навантаження від кузова на шийки осі не навантаженої колісної пари по вертикалі; $F_p = H_p$ – рамна сила, як частка горизонтальної поперечної сили F_y , що припадає на не навантажене колесо, кН; h - відстань від головки рейки до додатка рамної сили, м (зазвичай приймають 0,54 м, оскільки $h = r_k + r_{ш}$, де r_k - радіус колеса, рівний для вантажного вагона 0,475 м; $r_{ш}$ – радіус шийки осі, рівний 0,065 м) ; I_n – нормальна складова сила інерції колісної пари в абсолютному русі, що враховує її рух з прискоренням в поперечному напрямку, кН [10]; I_z – сила інерції колісної пари в абсолютному русі, що враховує її рух з прискоренням по вертикалі, кН; $2L$ – відстань між точками прикладання сил до шийок осі, тобто відстань між серединами шийок колісної пари, м (зазвичай у вантажного піввагона 2,036 м) [26].

При цьому природним є, прикладена до шийки осі кожної колісної пари не навантаженої і навантаженої коліс певної частки сили F_y у вигляді рамної сили $F_p = H_p$ (див. рис. 5). При цьому $H_p = k_{11} F_y$, де k_{11} – частка рамної сили (причому в інженерних розрахунках при симетричному розміщенні центру мас

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вантажу щодо осі симетрії вагона на прямій ділянці колії можна прийняти $k_{II} = 0,25$, а при несиметричному – $k_{II} < 0,25$) [26].

Сила F_p являє собою суму паралельних сил F_{p1} і F_{p2} , напрями і лінія дії яких збігаються і які умовно прикладені до шийок осі однієї колісної пари, тобто $F_p = F_{p1} + F_{p2}$, причому F_{p1} – сила, прикладена до не навантаженої шийки, а F_{p2} – до навантаженої шийки осі [26].

Відзначимо, що схема прикладання сил до колісній парі вагона, показана на рис. 1, може бути активно використана при виконанні розрахунків стійкості колісних пар проти вкочування гребеня колеса на рейку і оцінці поперечного зсуву рейко-шпальної решітки під поїздом [5].

Визначення навантаження від кузова на шийки осі колісних пар по вертикалі $F_1 = F_{D0}$ і $F_2 = F_{B0}$ є самостійною прикладною задачею [6].

Постановка задачі. Потрібно аналітично знайти навантаження від кузова на шийки осі однієї колісної пари (у вигляді F_1 і F_2) і встановити вплив одночасного зміщення центру мас вантажу як уздовж, так і впоперек вагона щодо осі симетрії вагона на величину цих навантажень при впливі просторової системи сил [26].

Рішення. Загальновідомо [11], що згідно з рівнянням рівноваги просторової системи сил, паралельних осі z , геометричної статyki, в окремому випадку, рівнодіюча R (як навантаження від кузова на шийку осі колісної пари) двох паралельних сил F_{D0} і F_{B0} , спрямованих в одну сторону, дорівнює по модулю сумі модулів даних сил і спрямована в ту ж сторону. При цьому лінія дії рівнодіючої R , що проходить через центр O , ділить внутрішнім чином відстань між лініями дії даних сил $D0B0$ на частини, обернено пропорційні цим силам, наприклад, у вигляді: $F_{D0}/F_{B0} = OB_0/OD_0$ [26].

У зв'язку з цим, розкладаючи всі сили (наприклад, G_{0z} і I_{ez0} , нехтуючи проекцією $F_{rв,y}$ у на вісь z , на увазі малості $\sin(\theta - \eta + \zeta)$), паралельні осі Oz , на складові, і вважаючи, що загальний центр мас вантажу зміщений тільки щодо поздовжньої осі вагона (окремий випадок), маємо:

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F_z = F_{B0} + F_{D0}; \frac{F_{D0}}{F_{B0}} = F_z \frac{OB_0 + y_{C0}}{OD_0 - y_{C0}}.$$

Зробивши елементарні математичні викладки над останніми виразами, отримаємо сили F_{D0} і F_{B0} , прикладені на шийки осі колісної пари:

$$F_{D0} = F_z \frac{OB_0 + y_{C0}}{D_0 B_0}; F_{B0} = F_z - F_{D0}, \quad (1.4)$$

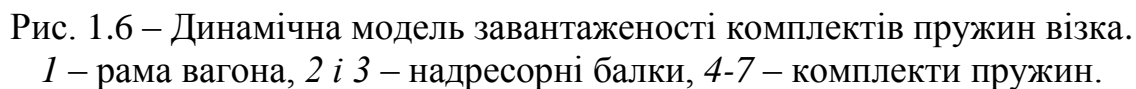
де F_z – проекція всіх динамічних сил на вісь Oz : $F_z = G_{0z} + I_{ez0}$ з урахуванням того, що $G_{0z} = G_0 \cos(\theta - \eta + \zeta)$; $D_0 B_0$ – відстань між точками прикладання сил до шийок осі, тобто відстань між серединами шийок колісної пари (зазвичай у вантажного піввагона 2 036 мм), причому $D_0 B_0 = D_0 O + OB_0$; OB_0 – половина відстані між осями шийки колісної пари (1 018 мм).

Особливо підкреслимо, що отримане значення сил F_{D0} являють собою суму динамічних сил, прикладених до шийок осі всіх чотирьох колісних пар, що спираються на наполегливу нитку спільно з гребенями зовнішніх коліс, а F_{B0} – спираються на внутрішню рейкову нитку поверхнями катання [26].

Надалі для визначення не навантаженого колеса візків необхідно мати частку ваги вагона з вантажем на кожну шийку осі колісних пар. У зв'язку з цим, розглянемо несиметричне розміщення твердотілого (их) вантажу (ів) щодо поздовжньої і поперечної осей симетрії вагона, наприклад, у бік опор B і D , на величини xM і yM (рис. 1.6) [12, 14].

Розташування загального центру мас вантажу $\text{ЦМ}_{\text{тр}}^0$ щодо поперечної xM і поздовжньої yM осей симетрії вагона (м) приймають залежно від ваги вантажу і висоти загального центру мас вагона з вантажем над рівнем головок рейок (УГР) за табл. 9 і 10 Додатки 14 до СМГС [9]. Так, для ваги вантажу $G = 560$ кН (56 тс) і висоти загального центру мас вагона з вантажем над УГР 2,0 м $xM = 1200$ і $yM = 165$ мм [26].

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		



На рис. 1.6, як і в [12, 14], позначені: точка O – початок координат, що збігається з центром перетину осей симетрії вагона, тобто з центром підлоги вагона; Ox , Oy і Oz – координатні осі; G^o – загальна вага вантажу (для штучних вантажів – G); $G_c = Q_c$ – сила тяжіння механічної системи «вантаж – рама вагона – надресорна балка»; \bar{a}_{ez} – вертикальне переносне прискорення будь-якої точки системи «вантаж – рама вагона – над ресорна балка»; I_{ex} , I_{ey} і I_{ez} – поздовжня, поперечна і вертикальна переносні сили інерції; I_{Cx} – сила інерції Каріоліса, що з'являється при зсуві вантажу уздовж вагона [8]; h^o – висота загального центру мас вантажів над підлогою вагона; h_c – висота загального центру мас системи над підлогою вагона: $h_c = G^o h^o / G_c$; $F_{rв,y}$ – сила аеродинамічного опору, прикладена до геометричного центру бічних поверхонь вагона і вантажу, що знаходиться від поперечної осі симетрії вагона на відстані x_{F_6} і від підлоги вагона на висоті h_{F_6} (причому $h_{F_6} = H_{F_{6y}} - h_6$, де $H_{F_{6y}}$ – відстань від геометричного центру бічних поверхонь вагона і вантажу над УГР, h_6 –

					<p style="text-align: center;"><i>МД ПМ81.000.00 ПЗ</i></p>	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

висота підлоги вагона над УГР (зазвичай у вантажних піввагонів 1 414 – 1 415 мм, біля платформи 1 310 мм)); $F_{ac,y}$ – сила, що виникає від впливу на вагон з вантажем автозчепних пристроїв суміжних вагонів; R_A , R_B і R_C , R_D – реакції комплектів пружин візків; $2l_{нб}$ – відстані між осями симетрії комплектів пружин візків, розміщених в отворах правої і лівої бокових рам, що відповідає відстані між середніми площинами буксового вузла (мм) (2 038 мм); $2l_e$ – база вагона (мм) (9 720 мм); xM і yM – зміщення центру мас вантажу ЦМ⁰ щодо поперечної і поздовжньої осі симетрії вагона, рекомендовані значення яких беруть згідно табл. 9 і 10 Додатки 14 до СМГС [9]; ξ_p і ζ_p – кути нахилу рами вагона вздовж і впоперек вагона; M_{ex} і M_{ey} – моменти від приведення сил I_{ex} і I_{ey} до центру мас системи: $M_{ex} = I_{ex}h_{ex}$ і $M_{ey} = I_{ey}h_{ex}$, де h_{ex} і h_{ey} – плече прикладання сил I_{ex} і I_{ey} від центру мас системи, причому $h_{ex} = h_{ey} = h^o - h_c$ [26].

Далі, як і раніше, скористалися теоремою про рівнодіючої плоскої системи сил (теорема Варіньона) і поняттям центру мас механічної системи «вантаж – рама вагона – над ресорна балка», оскільки стійкість вагона визначається положенням центру мас системи ЦМ_С, а не вантажу ЦМ⁰.

У математичній моделі зміщення центру мас системи ЦМ^c_{рг} в бік зовнішньої або внутрішньої рейкової нитки буде враховано лише знаками зміщення загального центру мас вагона з вантажем як механічних систем yM і кута ζ . При зсуві центру мас матеріальної системи (вантаж) ЦМ⁰ поперек вагона на величину $+yM$ відбувається нахил рами вагона з вантажем убік зсуву вантажу [26].

В даному випадку на підп'ятник надресорної балки через п'ятник рами вагона на відстані y_C від його вертикальної осі передаватимуться сили тиску з боку рами вагона з вантажем. При цьому відбувається перевантаження комплектів пружин опори D і розвантаження таких же пружин опори B переднього візка (рис. 1.7, а) [26].

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата		

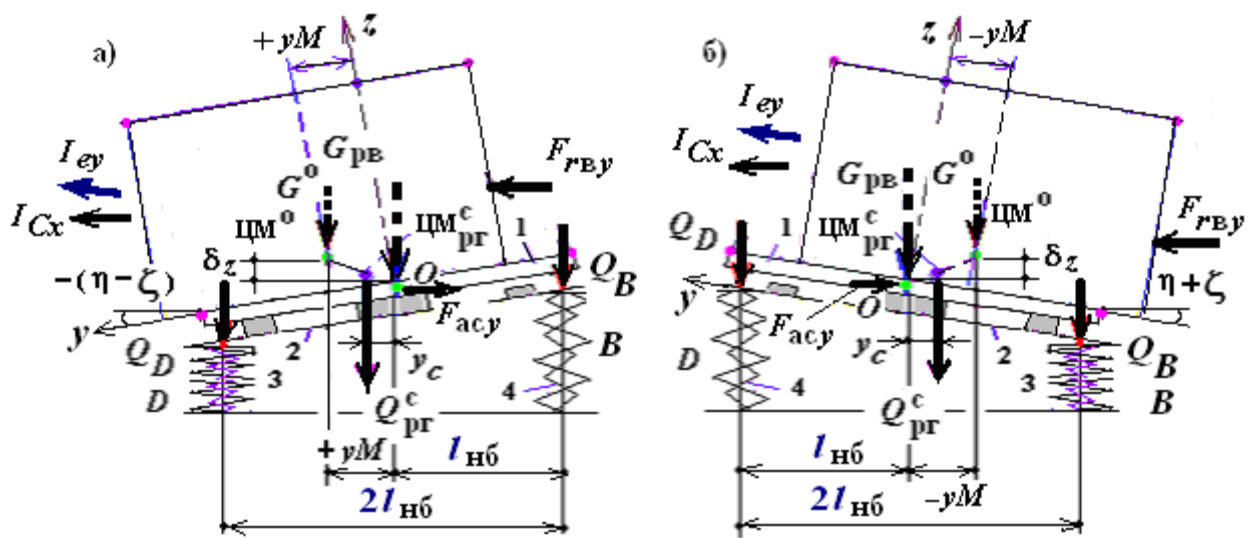


Рис. 1.7 – Схема прикладання сил на вагон при розміщенні вантажу зі зміщенням центру мас поперек вагона

На рис. 1.7 позначені: Q_B і Q_D – сили тиску хвостових частин надресорної балки на комплекти пружин візків, які відповідно до закону механіки рівні й протилежні реакціям комплектів пружин візків R_B і R_D ; F_{asy} – проекція сили, що виникає від впливу на вагон з вантажем автозчепних пристроїв суміжних вагонів, на поперечну вісь. Інші позначення ті ж, що і на рис. 1.6 [26].

При зсуві центру мас $\text{ЦМ}^c_{\text{рг}}$ механічної системи «вантаж – рама вагону» на $-yM$ рама вагона і надресорні балки передньої і задньої візків будуть нахилені в бік внутрішньої рейкової нитки на кут $-\zeta$. Відбувається перевантаження комплектів пружин B і розвантаження пружин D передньої візки (див. Рис. 3, б), а вагон з вантажем (рама вагона і надресорні балки) у складі поїзда буде знаходитися в нахиленому положенні, що може призвести до виникнення ймовірності вкочування не навантаженої колісної пари візків (D) на опорну нитку [26].

Відзначимо, що в математичній моделі руху рухомого складу по кривому ділянці шляху на спуск зсув центра мас вагона з вантажем $\text{ЦМ}^c_{\text{рг}}$ в бік передньої (або задньої) візки буде враховано лише знаками $\pm xM$ і кута $\pm \zeta$, а в бік зовнішньої (або внутрішньої) рейкової нитки $\pm yM$ і кута $\pm \zeta$.

Складаючи умови рівноваги просторової системи сил, аналогічно [12, 14], і нехтуючи проекцією сили I_{ey} на вертикаль і величиною сили I_{cx} на увазі їх

малості, отримують наступну систему лінійних алгебраїчних рівнянь для відшукування невідомих реакції комплектів пружин візків:

$$\begin{aligned} R_A + R_B + R_C + R_D &= Q_c; \\ -lR_A - lR_B + lR_C + lR_D &= Q_c y_c + I_{ey} h_c + F_{rB.y} h_{Fry} - M_{ey}; \\ l_b R_A - l_b R_B + l_b R_C - l_b R_D &= -Q_c x_c - I_{ex} h_c + M_{ex}; \\ R_A - R_B - R_C + R_D &= 0, \end{aligned} \quad (1.5)$$

де l_b – половина бази вагона (мм) (4 860 мм); $l = l_{нб}$ – половина відстані між осями симетрії комплектів пружин візків, розміщених в порізах правої і лівої бічних рам (мм) (1 019 мм).

Вирішуючи аналітично (символічно) отриману систему з використанням визначника матриці обчислювального середовища MathCAD, знаходять реакції комплектів пружин А, В, С і D, на відміну від [12, 14], у вигляді:

$$\begin{aligned} R_A &= \frac{Q_c}{4} \left(1 - \frac{y_c}{l} - \frac{x_c}{l_b} \right) - \frac{I_{ey} h_c + F_{rB.y} h_{Fry} - M_{ey}}{4l} - \frac{I_{ex} h_c - M_{ex}}{4l_b}; \\ R_B &= \frac{Q_c}{4} \left(1 + \frac{x_c}{l_b} - \frac{y_c}{l} \right) - \frac{I_{ey} h_c + F_{rB.y} h_{Fry} - M_{ey}}{4l} + \frac{I_{ex} h_c - M_{ex}}{4l_b}; \\ R_C &= \frac{Q_c}{4} \left(1 - \frac{x_c}{l_b} + \frac{y_c}{l} \right) + \frac{I_{ey} h_c + F_{rB.y} h_{Fry} - M_{ey}}{4l} - \frac{I_{ex} h_c - M_{ex}}{4l_b}; \\ R_D &= \frac{Q_c}{4} \left(1 + \frac{x_c}{l_b} + \frac{y_c}{l} \right) + \frac{I_{ey} h_c + F_{rB.y} h_{Fry} - M_{ey}}{4l} + \frac{I_{ex} h_c - M_{ex}}{4l_b}. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Аналіз отриманих кінцевих аналітичних формул показує, що при одночасному зміщенні центру мас вантажу як уздовж, так і впоперек вагона на величини $+xM$ і $+yM$ (I квадрант координатної осі $Oxyz$) та рух рухомого складу по напрямку осі Ox (див. Рис. 1.6) , найбільш перевантаженими виявляться комплекти пружин D переднього візка, що підвищує ймовірність опускання передньої колісної пари даного візки на зовнішню рейкову нитку. І, навпаки, при одночасному зміщенні центру мас вантажу як уздовж, так і

впоперек вагона на величини $-xM$ і $-yM$ (III квадрант координатної осі $Oxyz$) і руху рухомого складу по напрямку осі Ox (див. Рис. 1.6), найбільш не навантаженими виявляться комплекти пружин D переднього візка, що підвищує ймовірність вкочування не навантаженого колеса даного візка на головку рейки. При цьому, згідно [2], не навантажене колесо може бути прийняте за найменш навантажене просторовими силами колесо, при яких воно має найгіршу стійкість на рейці [26].

У цих випадках буксових вузол передньої колісної пари передньої візки буде відчувати долю реакції R_D і R_B (див. (5)) комплектів пружин D і B від впливу на вагон з вантажем просторової системи сил. Наприклад, у вигляді $F_1 = F_{D0} = k_{11}R_D$ і $F_2 = F_{B0} = k_{12}R_B$ (див. (4), рис. 1.5). В інженерних розрахунках при симетричному розміщенні центру мас вантажу щодо осі симетрії вагона на прямій ділянці колії $k_{11} = k_{12} = 0,5$. При несиметричному симетричному розміщенні центру мас вантажу значення k_{11} і k_{12} при $+xM$ і $+yM$ можуть бути більше 0,5 для перевантажених і при $-xM$ і $-yM$ менше 0,5 для ненавантажених коліс. Аналогічне зіставлення справедливо для розвантажених або перевантажених комплектів пружин A і C заднього візка вагона при русі рухомого складу протилежно напрямку осі Ox [26].

Результати розрахунків. Для прикладу виконаний приблизний розрахунок величин осьових сил, що впливають на шийки осі колісних пар візків, з використанням аналітичних формул (1.5). Вихідними даними були: вага вантажу $G = 560$ кН, сили аеродинамічного опору $F_{r\&y} = 18,5$ кН, коефіцієнти, що враховують рух вагона з прискоренням в поздовжньому, поперечному і вертикальному напрямку: $k_{ex} = 0,3$; $k_{ey} = 0,46$; $k_{ez} = 0,66$; вертикальна динамічна сила, що впливає з боку надресорної частини вагона з вантажем на комплекти пружин візків $Q_c = 1\,122$ кН; зміщення центру мас вантажу уздовж вагона в бік передньої візки $xM = 1,2$ м, а поперек вагона в бік зовнішньої рейкової нитки $yM = 0,165$ м [26].

Осьові сили, що діють на шийку осі перевантаженого колеса першого колісної пари передньої візки, виявилися рівними $F_1 = F_{D0} = 169,2$ (надто великі) і $F_2 = F_{B0} = 145$ кН, а не навантаженого колеса другої колісної пари

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата		

заднього візка – $F_1 = F_{A0} = 111,3$ і $F_2 = F_{C0} = 135,5$ кН. При зсуві центру мас вантажу уздовж вагона у бік задньої візки на величину $-xM$, а поперек вагона в бік внутрішньої рейкової нитки на $-yM$ не навантаженими виявляються колеса першого колісної пари передньої візки, а перевантаженими – другий колісної пари заднього візка. При симетричному розміщенні центру мас вантажу щодо осі симетрії вагона: $F_1 \approx F_2 \approx 140$ кН. Як видно, колесо, осьові сили перевантаженого колеса перевищують середні значення порядку 1,2 рази. Для зменшення осьових сил слід зменшити нормативні значення зсувів центра мас вантажу щодо осі симетрії вагона, передбачені в табл. 9 і 10 Додатки 14 до СМГС [9].

Таким чином, аналітично і чисельно встановлено вплив несиметричного розміщення центру мас вантажу щодо осі симетрії вагона на величину осьових сил колісної пари візків незалежно від того, чи рухається вагона по кривому або по прямій ділянці шляху [26].

1.3. Аналіз способів та засобів визначення центра мас

До найближчих аналогів розроблюваної системи вимірювання центру ваги можна віднести корисну модель ваг вагонних з цифровими датчиками з визначенням відхилення центру тяжіння вагон (патент 116123 UA).

Корисна модель належить до ваговимірювальної техніки та може бути використана, коли потрібно визначити центр тяжіння вагона та його відхилення від повздовжньої та поперечної осі, у тому разі, коли як датчики ваги застосовуються цифрові датчики [16].

Задачею корисної моделі є усунення залежності від стану електромагнітного середовища та схильності до відмов та похибок з цього приводу [16].

Відомі ваги для вимірювання маси вантажу (патент України № 47685 "Ваги вагонні з визначенням відхилень центра ваги вагона" найближчий аналог), які мають дві вантажоприймальні платформи, кожна з яких опирається на чотири ваговимірювальні датчики, встановлені по кутах платформи, мікропроцесорний контролер з енергонезалежною пам'яттю, інтерфейс для

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підключення принтера, інтерфейс для підключення виносного інформаційного табло, інтерфейс для підключення ПЕОМ, чотири суматори, чотири аналого-цифрових перетворювачі, клавіатуру та індикатор, причому на два входи кожного з суматорів підведені виходи двох ваговимірювальних датчиків, які встановлені по один бік кожної платформи, а вихід кожного суматора зв'язаний зі входом аналого-цифрового перетворювача, вихід якого підключений до відповідного входу мікропроцесорного контролера, при цьому відхилення центра ваги вагона відносно повздовжньої осі вираховується мікропроцесорним контролером за формулою [16]:

$$\Delta y = \frac{L}{2G_B} (G_{лб} - G_{пб}),$$

а відхилення центра ваги вагона відносно поперечної осі вираховується мікропроцесорним контролером за формулою[16]:

$$\Delta x = \frac{B}{2G_B} (G_{м1} - G_{м2}),$$

де:

L – відстань між осями ваговимірювальних датчиків, які знаходяться по обидві сторони колії;

B – база вагона;

$G_{лб}$ та $G_{пб}$ – вага лівого та правого бортів вагона, відповідно, які вираховуються за формулами[16]:

$$G_{лб} = G_{1лб} + G_{2лб},$$

$$G_{пб} = G_{1пб} + G_{2пб},$$

$G_{м1}$ та $G_{м2}$ – вага першого та другого візків, відповідно, які вираховується за формулами[16]:

$$G_{м1} = G_{1лб} + G_{2лб},$$

$$G_{м2} = G_{1пб} + G_{2пб},$$

де:

$G_{1лб}$, $G_{1пб}$, $G_{2лб}$, $G_{2пб}$ – маса, відповідно, лівого борту першого візка, правого борту першого візка, лівого борту другого візка, правого борту другого візка,

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

при цьому вихід клавіатури підключений до входу мікропроцесорного контролера, а вихід контролера підключений до входу індикатора [16].

Однак, ці ваги також мають недоліки. Насамперед, при зважуванні вагонів згаданими вагами виникає необхідність введення з клавіатури значень бази вагона та відстані між осями ваговимірювальних датчиків, що знаходяться по обидві сторони колії, при кожному зважуванні, що призводить до значних витрат часу та підвищує вірогідність помилок, пов'язаних з людським чинником. Крім того, недоліком вказаних ваг є неможливість визначення відхилення центра тяжіння вагона в одиницях маси вантажу, що було б значно ефективнішим для корекції (центрування) положення вантажу у вагоні, тобто завантаження або вивантаження потрібної кількості вантажу в певну частину (або частини) вагона [16].

Задачею даної корисної моделі є значне підвищення оперативності та зручності дотримування вимог центрування вантажу в залізничних вагонах під час або після їх завантаження за рахунок такого удосконалення конструкції ваг, щоб було можливим визначення відхилення центра тяжіння вагона в одиницях маси вантажу та щоб при кожному зважуванні не треба було вводити з клавіатури значення бази вагона та відстані між осями ваговимірювальних датчиків, що знаходяться по обидві сторони колії [16].

Висновок

Оскільки залізничний транспорт займає важливе місце в транспортній галузі України та сполучає вантажні перевезення з країн Європи та Азії. Тому однією із головних задач для країни є забезпечення роботи залізниці з високою ефективністю. Високу ефективність залізниці можна описати складовими – це безпека руху та висока пропускна здатність. У приведеному аналізі зазначалося, що дія повздовжніх та поперечних сил, які виникають при не правильному завантаженні вагону впливає на його стійкість при русі, як наслідок вагон (вагони) з ходить з рейок. Такі випадки призводять до пошкодження як самих вагонів так і колійного господарства. І таким чином

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підвищення швидкості руху залізничних складів вагонів стає неможливим, оскільки при збільшені швидкості дія цих сил ще збільшується.

Тому для забезпечення високої ефективності залізниці пропонується система, що дозволить контролювати правильність завантаження вантажних вагонів. Дане рішення знизить аварійність залізничного вантажного транспорту на шляхах та дасть змогу підвищити швидкість транспортування.

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ

Всі методи вимірювання центру мас можна віднести до непрямих методів вимірювання, тому що координати центру мас визначаються не відносно конструктивних осей об'єктів, а відносно систем координат пов'язаних з вимірювальними перетворювачами. Тобто необхідна додаткова процедура перерахунку одержаних результатів з одних систем координат до систем пов'язаних з об'єктами. В результаті виникають невизначеності обумовлені як суб'єктивними оціночними значеннями параметрів приведення систем координат так і їх ймовірнісним характером.

Методи розрахунку параметрів центру ваги (ЦВ) відносно довільної системи координат пов'язаних з вимірювачами теж можна прокласифікувати по мірі повноти інформації одержаної безпосередньо вимірюваннями.

Так алгоритми розрахунку параметрів ЦВ оперують: 1) значеннями сил навантаження, які сприймають окремі ваговимірювальні перетворювачі, або значеннями попередньо зважених дискретних вантажів; 2) значеннями координат перетворювачів, які сприймають навантаження або координат центрів вантажів, які розміщуються на рухомих об'єктах.

В сучасній практиці методи визначення ЦВ використовують інформацію яка носить оціночний характер: наприклад, в алгоритмах [16, 17] передбачається, що значення координат перетворювачів апріорно відомі; в алгоритмах [18, 19] передбачається, що відомі координати ЦВ окремих дискретних вантажів в першому випадку по відношенню до головних осей об'єкту, а в іншому по відношенню до реперних точок вантажу, які вимірюються оптичними методами.

Відсутність ваговимірювальних систем визначення загальної маси рухомих об'єктів і положення центру мас за двома координатами визначається відсутністю теоретичних основ та метрологічного забезпечення таких вимірювань.

Метою роботи являється розробка алгоритмічних основ побудови ваговимірювальної системи для визначення положення центру ваги в системі

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

координат, яка пов'язана з ваговимірювальними перетворювачами та загальної маси рухомих об'єктів.

2.1 Опис системи вимірювання положення центру ваги

Основні технічні вимоги, що висуваються до розроблюваної системи вимірювання центра ваги.

Облікові величини: маси – кілограми, координат – міліметри;

Тип перетворювача ваги: тензорезисторний;

Похибка вимірювання тензодатчика не більше: 0,02 %;

Вимірювання ваги: 0,2%;

Похибка вимірювання положення центру ваги: 0,5%;

Інтерфейс передачі інформації: RS-485;

Живлення: 12В;

Система, що розробляється складається із двох вагоприймальних платформ, кожна з яких опирається на чотири цифрових ваговимірювальних тензоперетворювачів. Вихідні сигнали із всіх тензодатчиків з'єднуються інтерфейсною шиною, яка підведена до інтересного входу мікропроцесорного електронного обчислювача. Живлення датчиків здійснюється блоком живлення.

Система працює наступним чином кожен візок вагону розміщується на своїй платформі, а сигнали з тензодатчиків по чергово передаються по інтерфейсній шині до мікропроцесорного електронного обчислювача. Далі за допомогою програмного забезпечення, що працює за розробленим алгоритмом йде обчислення загальної маси вагону та обчислення координат центру ваги в домірному просторі.

Всі результати розрахунків передаються з мікропроцесорного електронного обчислювача до індикатора та відображається на ньому, що дає можливість оператору ваг контролювати процес завантаження вагону та впливати, за необхідністю, на нього.

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		

2.2. Задача аналізу.

Розглянемо систему, яка побудована на чотирьох тензорезисторних датчиках. Нехай в системі координат, що зв'язані з жорсткою платформою ОХУ задані положення точок:

X_1, Y_1 – координати першого датчика;

X_2, Y_2 – координати другого датчика;

X_3, Y_3 – координати третього датчика;

X_4, Y_4 – координати четвертого датчика.

де $X_i, Y_i, i = 1 \dots 4$, координати в яких платформа опирається на чотири силовимірювальних перетворювачів. Тоді при розташуванні на платформі вантажу масою M_0 , силова дія на платформу, вага буде дорівнювати:

$$G_0 = M_0 \cdot g, \quad (2.1)$$

де:

M_0 – маса вантажу;

g – прискорення вільного падіння.

Отже, систему рівнянь статичної рівноваги можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} G_0 &= R_1 + R_2 + R_3 + R_4, \\ \begin{cases} R_1 \cdot X_1 + R_2 \cdot X_2 + R_3 \cdot X_3 + R_4 \cdot X_4 = G_0 X_0, \\ R_1 \cdot Y_1 + R_2 \cdot Y_2 + R_3 \cdot Y_3 + R_4 \cdot Y_4 = G_0 Y_0. \end{cases} \end{aligned} \quad (2.2)$$

2.3. Задача вимірювання.

Із рівнянь статички (2.2) можна отримати систему рівнянь вимірювання ваги G_0 та координати центра ваги вантажу (X_0, Y_0). Із першого рівняння можна знайти вагу вантажу, оскільки вага дорівнює сумі реакції датчиків, то:

$$G_0 = R_1 + R_2 + R_3 + R_4.$$

Із другого та третього рівняння можна знайти відповідно координати центру ваги X_0, Y_0 :

$$X_0 = \frac{R_1}{G_0} \cdot X_1 + \frac{R_2}{G_0} \cdot X_2 + \frac{R_3}{G_0} \cdot X_3 + \frac{R_4}{G_0} \cdot X_4;$$

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Y_0 = \frac{R_1}{G_0} \cdot Y_1 + \frac{R_2}{G_0} \cdot Y_2 + \frac{R_3}{G_0} \cdot Y_3 + \frac{R_4}{G_0} \cdot Y_4.$$

2.4. Задача калібрування

Як видно із системи рівнянь 2.2 задача 2-й раз статично невизначена, при умові що параметри статичної характеристики перетворювачів відомі. Проведемо чотири експериментальних навантаження G_1, G_2, G_3, G_4 у точках $X_{11}, Y_{11}; X_{22}, Y_{22}; X_{33}, Y_{33}; X_{44}, Y_{44}$ відповідно та запишемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} R_{11} \cdot X_1 + R_{21} \cdot X_2 + R_{31} \cdot X_3 + R_{41} \cdot X_4 = G_1 X_{11}; \\ R_{11} \cdot Y_1 + R_{21} \cdot Y_2 + R_{31} \cdot Y_3 + R_{41} \cdot Y_4 = G_1 Y_{11}; \\ R_{12} \cdot X_1 + R_{22} \cdot X_2 + R_{32} \cdot X_3 + R_{42} \cdot X_4 = G_2 X_{22}; \\ R_{12} \cdot Y_1 + R_{22} \cdot Y_2 + R_{32} \cdot Y_3 + R_{42} \cdot Y_4 = G_2 Y_{22}; \\ R_{13} \cdot X_1 + R_{23} \cdot X_2 + R_{33} \cdot X_3 + R_{43} \cdot X_4 = G_3 X_{33}; \\ R_{13} \cdot Y_1 + R_{23} \cdot Y_2 + R_{33} \cdot Y_3 + R_{43} \cdot Y_4 = G_3 Y_{33}; \\ R_{14} \cdot X_1 + R_{24} \cdot X_2 + R_{34} \cdot X_3 + R_{44} \cdot X_4 = G_4 X_{44}; \\ R_{14} \cdot Y_1 + R_{24} \cdot Y_2 + R_{34} \cdot Y_3 + R_{44} \cdot Y_4 = G_4 Y_{44}. \end{cases} \quad (2.3)$$

де:

$$G_1 = R_{11} + R_{21} + R_{31} + R_{41};$$

$$G_2 = R_{12} + R_{22} + R_{32} + R_{42};$$

$$G_3 = R_{13} + R_{23} + R_{33} + R_{43};$$

$$G_4 = R_{14} + R_{24} + R_{34} + R_{44}.$$

R_{ij} – i датчик, j – навантаження.

Підставивши значення G_1, G_2, G_3, G_4 в систему рівняння 3 отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} R_{11} \cdot X_1 + R_{21} \cdot X_2 + R_{31} \cdot X_3 + R_{41} \cdot X_4 = (R_{11} + R_{21} + R_{31} + R_{41}) \cdot X_{11}; \\ R_{11} \cdot Y_1 + R_{21} \cdot Y_2 + R_{31} \cdot Y_3 + R_{41} \cdot Y_4 = (R_{11} + R_{21} + R_{31} + R_{41}) \cdot Y_{11}; \\ R_{12} \cdot X_1 + R_{22} \cdot X_2 + R_{32} \cdot X_3 + R_{42} \cdot X_4 = (R_{12} + R_{22} + R_{32} + R_{42}) \cdot X_{22}; \\ R_{12} \cdot Y_1 + R_{22} \cdot Y_2 + R_{32} \cdot Y_3 + R_{42} \cdot Y_4 = (R_{12} + R_{22} + R_{32} + R_{42}) \cdot Y_{22}; \\ R_{13} \cdot X_1 + R_{23} \cdot X_2 + R_{33} \cdot X_3 + R_{43} \cdot X_4 = (R_{13} + R_{23} + R_{33} + R_{43}) \cdot X_{33}; \\ R_{13} \cdot Y_1 + R_{23} \cdot Y_2 + R_{33} \cdot Y_3 + R_{43} \cdot Y_4 = (R_{13} + R_{23} + R_{33} + R_{43}) \cdot Y_{33}; \\ R_{14} \cdot X_1 + R_{24} \cdot X_2 + R_{34} \cdot X_3 + R_{44} \cdot X_4 = (R_{14} + R_{24} + R_{34} + R_{44}) \cdot X_{44}; \\ R_{14} \cdot Y_1 + R_{24} \cdot Y_2 + R_{34} \cdot Y_3 + R_{44} \cdot Y_4 = (R_{14} + R_{24} + R_{34} + R_{44}) \cdot Y_{44}. \end{cases} \quad (2.4)$$

Для знаходження невідомих (координат прикладання сили до датчиків) запишемо систему рівнянь у векторно-матричному виді:

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{21} & R_{31} & R_{41} \\ R_{12} & R_{22} & R_{32} & R_{42} \\ R_{13} & R_{23} & R_{33} & R_{43} \\ R_{14} & R_{24} & R_{34} & R_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 \\ X_2 & Y_2 \\ X_3 & Y_3 \\ X_4 & Y_4 \end{bmatrix} = G_0 \begin{bmatrix} X_{11} & Y_{11} \\ X_{22} & Y_{22} \\ X_{33} & Y_{33} \\ X_{44} & Y_{44} \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

Далі знайдемо зворотну матрицю реакцій:

1) Знаходимо визначник матриці

$$\det A.$$

2) Транспонуємо матрицю:

$$A^T = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{21} & R_{31} & R_{41} \\ R_{12} & R_{22} & R_{32} & R_{42} \\ R_{13} & R_{23} & R_{33} & R_{43} \\ R_{14} & R_{24} & R_{34} & R_{44} \end{bmatrix}.$$

3) Знаходимо мінори та приводимо матрицю в загальний вигляд:

$$A^{-1} = \frac{1}{\det A} \cdot \begin{bmatrix} A_{11} & A_{21} & A_{31} & A_{41} \\ A_{12} & A_{22} & A_{32} & A_{42} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} & A_{43} \\ A_{14} & A_{24} & A_{34} & A_{44} \end{bmatrix};$$

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{A_{11}}{\det A} & \frac{A_{21}}{\det A} & \frac{A_{31}}{\det A} & \frac{A_{41}}{\det A} \\ \frac{A_{12}}{\det A} & \frac{A_{22}}{\det A} & \frac{A_{32}}{\det A} & \frac{A_{42}}{\det A} \\ \frac{A_{13}}{\det A} & \frac{A_{23}}{\det A} & \frac{A_{33}}{\det A} & \frac{A_{43}}{\det A} \\ \frac{A_{14}}{\det A} & \frac{A_{24}}{\det A} & \frac{A_{34}}{\det A} & \frac{A_{44}}{\det A} \end{bmatrix}.$$

Таким чином маємо:

$$A^{-1} \cdot A^1 \cdot \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 \\ X_2 & Y_2 \\ X_3 & Y_3 \\ X_4 & Y_4 \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} X_{11} & Y_{11} \\ X_{22} & Y_{22} \\ X_{33} & Y_{33} \\ X_{44} & Y_{44} \end{bmatrix}.$$

Звідки отримуємо координати датчиків:

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 \\ X_2 & Y_2 \\ X_3 & Y_3 \\ X_4 & Y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A_{11}}{\det A} & \frac{A_{21}}{\det A} & \frac{A_{31}}{\det A} & \frac{A_{41}}{\det A} \\ \frac{A_{12}}{\det A} & \frac{A_{22}}{\det A} & \frac{A_{32}}{\det A} & \frac{A_{42}}{\det A} \\ \frac{A_{13}}{\det A} & \frac{A_{23}}{\det A} & \frac{A_{33}}{\det A} & \frac{A_{43}}{\det A} \\ \frac{A_{14}}{\det A} & \frac{A_{24}}{\det A} & \frac{A_{34}}{\det A} & \frac{A_{44}}{\det A} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{11} & Y_{11} \\ X_{22} & Y_{22} \\ X_{33} & Y_{33} \\ X_{44} & Y_{44} \end{bmatrix}.$$

Якщо ж система має невідомі параметри S_i та U_{i0} невизначеність системи збільшується до $4 \cdot n$ раз. Таким чином маємо систему:

$$\begin{cases} \frac{(K_{ij} - K_{0i})}{S_i} \cdot X_1 + \frac{(K_{ij} - K_{0i})}{S_i} \cdot X_2 + \frac{(K_{ij} - K_{0i})}{S_i} \cdot X_3 + \frac{(K_{ij} - K_{0i})}{S_i} \cdot X_4 = X_{ii} G_0; \\ \frac{(K_{ij} - K_{0i})}{S_i} \cdot Y_1 + \frac{(K_{ij} - K_{0i})}{S_i} \cdot Y_2 + \frac{(K_{ij} - K_{0i})}{S_i} \cdot Y_3 + \frac{(K_{ij} - K_{0i})}{S_i} \cdot Y_4 = Y_{ii} G_0. \end{cases}$$

де:

X_i, Y_i – координати тензодатчиків де $i = 1 \dots 4$;

X_{ii}, Y_{ii} – координати прикладання тестового навантаження $i = 1 \dots 8$.

А значення перетворення навантаження визначається за виразом:

$$R_{ij} = \frac{(K_{ij} - K_{0i})}{S_i},$$

де:

S_i – чутливість i -го перетворювача де $i = 1 \dots 4$;

K_{i0} – початковий вихідний код i -го перетворювача де $i = 1 \dots 8$;

K_{ij} – вихідний код i -го перетворювача при j -ом навантаженні де $i = 1 \dots 8, j = 1 \dots 4$.

2.5. Чисельне представлення роботи алгоритму

Для наочного представлення функціонування системи проведемо чисельний розрахунок за допомогою розробленого алгоритму:

Калібрування

Нехай дано чутливості датчиків в грам/код $S_1 = 200,08$; $S_2 = 192,74$; $S_3 = 193,13$; $S_4 = 196,13$ (значення чутливостей було визначено із градувальник характеристик експериментальним шляхом (в розділі 3 в пункті 3), вхідні коди з датчиків та координати прикладання навантаження (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Координати прикладання		Датчик 1	Датчик 2	Датчик 3	Датчик 4
X, см	Y, см				
без навантаження		326160	411675	340088	247848
10	20	408413	378355	424139	213911
30	15	357119	406324	399959	260341
50	25	344059	465932	338856	274571
70	5	275212	440590	331983	375124

1. Визначаємо значення перетворення датчиків при кожному їх навантаженні:

$$R_{ij} = \frac{K_{ij} - K_{0i}}{S_i},$$

де:

S_i – чутливість i -го перетворювача;

K_{i0} – початковий вихідний код i -го перетворювача;

K_{ij} – вихідний код i - го перетворювача при j - ом навантаженні.

$$R_{11} = \frac{408413 - 326160}{200,08} = 411,10 \text{ г}; R_{21} = \frac{378355 - 411675}{192,74} = -172,84 \text{ г};$$

$$R_{31} = \frac{424139 - 340088}{193,13} = 435,11 \text{ г}; R_{41} = \frac{213911 - 247848}{196,13} = -172,70 \text{ г};$$

$$R_{12} = 154,73 \text{ г}; R_{22} = -27,76 \text{ г}; R_{32} = 309,94 \text{ г}; R_{42} = 63,58 \text{ г};$$

$$R_{13} = 89,46 \text{ г}; R_{23} = 281,44 \text{ г}; R_{33} = -6,38 \text{ г}; R_{43} = 135,99 \text{ г};$$

$$R_{14} = -254,64 \text{ г}; R_{24} = 149,99 \text{ г}; R_{34} = -41,96 \text{ г}; R_{44} = 647,69 \text{ г}.$$

2. Знаходимо суму перетворень:

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$G_1 = R_{11} + R_{21} + R_{31} + R_{41};$$

$$G_1 = 411,10 + (-172,84) + 435,11 + (-172,70) = 500.67 \text{ г};$$

$$G_2 = R_{12} + R_{22} + R_{32} + R_{42};$$

$$G_2 = 154,73 + (-27,76) + 309,94 + 63,58 = 500.49 \text{ г};$$

$$G_3 = R_{13} + R_{23} + R_{33} + R_{43};$$

$$G_3 = 89,46 + 281,44 + (-6,38) + 135,99 = 500.51 \text{ г};$$

$$G_4 = R_{14} + R_{24} + R_{34} + R_{44};$$

$$G_4 = (-254,64) + 149,99 + (-41,96) + 647,69 = 501.08 \text{ г}.$$

3. Нормалізуємо перетворення:

$$N_{ij} = \frac{R_{ij}}{G_j},$$

де:

R_{ij} – перетворення i -го перетворювача при j -ом навантаженні;

G_j – j навантаження.

$$N_{11} = \frac{411,10}{500.67} = 0,82; N_{21} = \frac{-172,84}{500.67} = -0,35;$$

$$N_{31} = \frac{435,11}{500.67} = 0,87; N_{31} = \frac{-172,70}{500.67} = -0,34;$$

$$N_{12} = 0.31; N_{22} = -0.06; N_{32} = 0.62; N_{42} = 0.13;$$

$$N_{13} = 0.18; N_{23} = 0.56; N_{33} = -0.01; N_{43} = 0.27;$$

$$N_{14} = -0.51; N_{24} = 0.30; N_{34} = -0.08; N_{44} = 1.29.$$

Таким чином маємо:

$$\begin{vmatrix} 0,82 & -0,35 & 0,87 & -0,34 \\ 0.31 & -0.06 & 0.62 & 0.13 \\ 0.18 & 0.56 & -0.01 & 0.27 \\ -0.51 & 0.30 & -0.08 & 1.29 \end{vmatrix}.$$

4. Знаходимо зворотню матрицю:

4.1. Знаходимо головний визначник матриці:

Запишемо перший мінор та знайдемо його визначник:

$$\Delta_{1,1} = \begin{vmatrix} -0.06 & 0.62 & 0.13 \\ 0.56 & -0.01 & 0.27 \\ 0.30 & -0.08 & 1.29 \end{vmatrix} =$$

$$= -0.06 \cdot (-0.01 \cdot 1.29 - (-0.08 \cdot 0.27)) - 0.56 \cdot (0.62 \cdot 1.29 - (-0.08 \cdot 0.13)) + 0.3 \cdot (0.62 \cdot 0.27 - (-0.01 \cdot 0.13))$$

$$= -0.403624;$$

$$\Delta_{2,1} = \begin{vmatrix} -0.35 & 0.87 & -0.34 \\ 0.56 & -0.01 & 0.27 \\ 0.30 & -0.08 & 1.29 \end{vmatrix} =$$

$$= -0.35 \cdot (-0.01 \cdot 1.29 - (-0.08 \cdot 0.27)) - 0.56 \cdot (0.87 \cdot 1.29 - (-0.08 \cdot (-0.34))) + 0.3 \cdot (0.87 \cdot 0.27 - (-0.01 \cdot (-0.34)))$$

$$= -0.546851;$$

$$\Delta_{3,1} = \begin{vmatrix} -0.35 & 0.87 & -0.34 \\ -0.06 & 0.62 & 0.13 \\ 0.30 & -0.08 & 1.29 \end{vmatrix} =$$

$$= -0.35 \cdot (0.62 \cdot 1.29 - (-0.08 \cdot 0.13)) - (-0.06 \cdot (0.87 \cdot 1.29 - (-0.08 \cdot (-0.34)))) + 0.3 \cdot (0.87 \cdot 0.13 - 0.62 \cdot (-0.34))$$

$$= -0.120694;$$

$$\Delta_{4,1} = \begin{vmatrix} -0.35 & 0.87 & -0.34 \\ 0.06 & 0.62 & 0.13 \\ 0.56 & -0.01 & 0.27 \end{vmatrix} =$$

$$= 0.35 \cdot (0.62 \cdot 0.27 - (-0.01 \cdot 0.13)) - (-0.06 \cdot (0.87 \cdot 0.27 - (-0.01 \cdot (-0.34)))) + 0.56 \cdot (0.87 \cdot 0.13 - 0.62 \cdot (-0.34))$$

$$= 0.136229.$$

Таким чином головний визначник матриці:

$$\Delta = 0.82 \cdot (-0.4) - 0.31 \cdot (-0.55) + 0.18 \cdot (-0.12) - (-0.51 \cdot 0.14)$$

$$= -0.113696.$$

Оскільки визначник не дорівнює нулю, то для такої матриці можна знайти зворотну матрицю.

Зворотня матриця матиме наступний вигляд:

$$A^{-1} = \frac{1}{-0.113696} \begin{vmatrix} A_{11} & A_{21} & A_{31} & A_{41} \\ A_{12} & A_{22} & A_{32} & A_{42} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} & A_{43} \\ A_{14} & A_{24} & A_{34} & A_{44} \end{vmatrix}.$$

де A_{ij} – алгебраїчні доповнення

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2. Транспонуємо матрицю:

$$A^T = \begin{vmatrix} 0.82 & 0.31 & 0.18 & -0.51 \\ -0.35 & -0.06 & 0.56 & 0.30 \\ 0.87 & 0.62 & -0.01 & -0.08 \\ -0.34 & 0.13 & 0.27 & 1.29 \end{vmatrix}.$$

4.3. Знаходимо алгебраїчні доповнення матриці A^T :

$$\begin{aligned} A_{1,1}^T &= (-1)^{1+1} \begin{vmatrix} -0.06 & 0.56 & 0.30 \\ 0.62 & -0.01 & -0.08 \\ 0.13 & 0.27 & 1.29 \end{vmatrix} = \\ &= -0.06 \cdot (-0.01 \cdot 1.29 - 0.27 \cdot (-0.08)) - 0.62 \cdot (0.56 \cdot 1.29 - 0.27 \cdot 0.3) + 0.13 \cdot (0.56 \cdot (-0.08) - (-0.01 \cdot 0.3)) = -0.4036; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{1,2}^T &= (-1)^{1+2} \begin{vmatrix} -0.35 & 0.56 & 0.30 \\ 0.87 & -0.01 & -0.08 \\ -0.34 & 0.27 & 1.29 \end{vmatrix} = \\ &= -1 \cdot -0.35 \cdot (-0.01 \cdot 1.29 - 0.27 \cdot (-0.08)) - 0.87 \cdot (0.56 \cdot 1.29 - 0.27 \cdot 0.3) + (-0.34 \cdot (0.56 \cdot (-0.08) - (-0.01 \cdot 0.3))) = 0.5469; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{1,3}^T &= (-1)^{1+3} \begin{vmatrix} -0.35 & -0.06 & 0.30 \\ 0.87 & 0.62 & -0.08 \\ 0.34 & 0.13 & 1.29 \end{vmatrix} = \\ &= -0.35 \cdot (0.62 \cdot 1.29 - 0.13 \cdot (-0.08)) - 0.87 \cdot (-0.06 \cdot 1.29 - 0.13 \cdot 0.3) + (-0.34 \cdot (-0.06 \cdot (-0.08) - 0.62 \cdot 0.3)) = -0.1207; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{1,4}^T &= (-1)^{1+4} \begin{vmatrix} -0.35 & -0.06 & 0.56 \\ 0.87 & 0.62 & -0.01 \\ -0.34 & 0.13 & 0.27 \end{vmatrix} = \\ &= - - 0.35 \cdot (0.62 \cdot 0.27 - 0.13 \cdot (-0.01)) - 0.87 \cdot (-0.06 \cdot 0.27 - 0.13 \cdot 0.56) + (-0.34 \cdot (-0.06 \cdot (-0.01) - 0.62 \cdot 0.56)) \\ &= -0.1362; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{2,1}^T &= (-1)^{2+1} \begin{vmatrix} 0.31 & 0.18 & -0.51 \\ 0.62 & -0.01 & -0.08 \\ 0.13 & 0.27 & 1.29 \end{vmatrix} = \\ &= -0.31 \cdot (-0.01 \cdot 1.29 - 0.27 \cdot (-0.08)) - 0.62 \cdot (0.18 \cdot 1.29 - 0.27 \cdot (-0.51)) + 0.13 \cdot (0.18 \cdot (-0.08) - (-0.01 \cdot (-0.51))) = 0.2292; \end{aligned}$$

$$A_{2,2}^T = (-1)^{2+2} \begin{vmatrix} 0.82 & 0.18 & -0.51 \\ 0.87 & -0.01 & -0.08 \\ -0.34 & 0.27 & 1.29 \end{vmatrix} =$$

$$= 0.82 \cdot (-0.01 \cdot 1.29 - 0.27 \cdot (-0.08)) - 0.87 \cdot (0.18 \cdot 1.29 - 0.27 \cdot (-0.51)) + (-0.34 \cdot (0.18 \cdot (-0.08) - (-0.01 \cdot (-0.51)))) = -0.3080;$$

$$A_{2,3}^T = (-1)^{2+3} \begin{vmatrix} 0.82 & 0.31 & -0.51 \\ 0.87 & 0.62 & -0.08 \\ -0.34 & 0.13 & 1.29 \end{vmatrix} =$$

$$= -0.82 \cdot (0.62 \cdot 1.29 - 0.13 \cdot (-0.08)) - 0.87 \cdot (0.31 \cdot 1.29 - 0.13 \cdot (-0.51)) + (-0.34 \cdot (0.31 \cdot (-0.08) - 0.62 \cdot (-0.51))) = -0.1597;$$

$$A_{2,4}^T = (-1)^{2+4} \begin{vmatrix} 0.82 & 0.31 & 0.18 \\ 0.87 & 0.62 & -0.01 \\ -0.34 & 0.13 & 0.27 \end{vmatrix} =$$

$$= 0.82 \cdot (0.62 \cdot 0.27 - 0.13 \cdot (-0.01)) - 0.87 \cdot (0.31 \cdot 0.27 - 0.13 \cdot 0.18) + (-0.34 \cdot (0.31 \cdot (-0.01) - 0.62 \cdot 0.18)) = 0.1249;$$

$$A_{3,1}^T = (-1)^{3+1} \begin{vmatrix} 0.31 & 0.18 & -0.51 \\ -0.06 & 0.56 & 0.30 \\ 0.13 & 0.27 & 1.29 \end{vmatrix} =$$

$$= 0.31 \cdot (0.56 \cdot 1.29 - 0.27 \cdot 0.3) - (-0.06 \cdot (0.18 \cdot 1.29 - 0.27 \cdot (-0.51))) + 0.13 \cdot (0.18 \cdot 0.3 - 0.56 \cdot (-0.51)) = 0.2652;$$

$$A_{3,2}^T = (-1)^{3+2} \begin{vmatrix} 0.82 & 0.18 & -0.51 \\ -0.35 & 0.56 & 0.30 \\ -0.34 & 0.27 & 1.29 \end{vmatrix} =$$

$$= -0.82 \cdot (0.56 \cdot 1.29 - 0.27 \cdot 0.3) - (-0.35 \cdot (0.18 \cdot 1.29 - 0.27 \cdot (-0.51))) + (-0.34 \cdot (0.18 \cdot 0.3 - 0.56 \cdot (-0.51))) = -0.5399;$$

$$A_{3,3}^T = (-1)^{3+3} \begin{vmatrix} 0.82 & 0.31 & -0.51 \\ -0.35 & -0.06 & 0.30 \\ -0.34 & 0.13 & 1.29 \end{vmatrix} =$$

$$= 0.82 \cdot (-0.06 \cdot 1.29 - 0.13 \cdot 0.3) - (-0.35 \cdot (0.31 \cdot 1.29 - 0.13 \cdot (-0.51))) + (-0.34 \cdot (0.31 \cdot 0.3 - (-0.06 \cdot (-0.51)))) = 0.04651;$$

$$A_{3,4}^T = (-1)^{3+4} \begin{vmatrix} 0.82 & 0.31 & 0.18 \\ -0.35 & 0.06 & 0.56 \\ -0.34 & 0.13 & 0.27 \end{vmatrix} =$$

$$= -0.82 \cdot (-0.06 \cdot 0.27 - 0.13 \cdot 0.56) - (-0.35 \cdot (0.31 \cdot 0.27 - 0.13 \cdot 0.18)) + (-0.34 \cdot (0.31 \cdot 0.56 - (-0.06 \cdot 0.18))) = 0.1146;$$

$$A_{4,1}^T = (-1)^{4+1} \begin{vmatrix} 0.31 & 0.18 & -0.51 \\ -0.06 & 0.56 & 0.30 \\ 0.62 & -0.01 & -0.08 \end{vmatrix} =$$

$$= -0.31 \cdot (0.56 \cdot (-0.08) - (-0.01 \cdot 0.3)) - (-0.06 \cdot (0.18 \cdot (-0.08) - (-0.01 \cdot (-0.51)))) + 0.62 \cdot (0.18 \cdot 0.3 - 0.56 \cdot (-0.51))$$

$$= -0.1964;$$

$$A_{4,2}^T = (-1)^{4+2} \begin{vmatrix} 0.82 & 0.18 & -0.51 \\ -0.35 & 0.56 & 0.30 \\ 0.87 & -0.01 & -0.08 \end{vmatrix} =$$

$$= 0.82 \cdot (0.56 \cdot (-0.08) - (-0.01 \cdot 0.3)) - (-0.35 \cdot (0.18 \cdot (-0.08) - (-0.01 \cdot (-0.51)))) + 0.87 \cdot (0.18 \cdot 0.3 - 0.56 \cdot (-0.51))$$

$$= 0.2544;$$

$$A_{4,3}^T = (-1)^{4+3} \begin{vmatrix} 0.82 & 0.31 & -0.51 \\ -0.35 & -0.06 & 0.30 \\ 0.87 & 0.62 & -0.08 \end{vmatrix} =$$

$$= -0.82 \cdot (-0.06 \cdot (-0.08) - 0.62 \cdot 0.3) - (-0.35 \cdot (0.31 \cdot (-0.08) - 0.62 \cdot (-0.51))) + 0.87 \cdot (0.31 \cdot 0.3 - (-0.06 \cdot (-0.51)))$$

$$= -0.00769;$$

$$A_{4,4}^T = (-1)^{4+4} \begin{vmatrix} 0.82 & 0.31 & 0.18 \\ -0.35 & -0.06 & 0.56 \\ 0.87 & 0.62 & -0.01 \end{vmatrix} =$$

$$= 0.82 \cdot (-0.06 \cdot (-0.01) - 0.62 \cdot 0.56) - (-0.35 \cdot (0.31 \cdot (-0.01) - 0.62 \cdot 0.18)) + 0.87 \cdot (0.31 \cdot 0.56 - (-0.06 \cdot 0.18)) = -0.1639.$$

Таким чином маємо:

$$A^{-1} = \frac{1}{-0.150} \begin{vmatrix} -0.404 & 0.547 & -0.122 & -0.136 \\ 0.229 & -0.308 & -0.160 & 0.125 \\ 0.265 & -0.540 & 0.047 & 0.115 \\ -0.196 & 0.254 & -0.008 & -0.164 \end{vmatrix};$$

$$A^{-1} = \begin{vmatrix} 3.550 & -4.810 & 1.062 & 1.198 \\ -2.016 & 2.709 & 1.405 & -1.098 \\ -2.332 & 4.749 & -0.409 & -1.008 \\ 1.728 & -2.237 & 0.0677 & 1.442 \end{vmatrix}.$$

5. Перемножуємо матрицю на вектор координат, що задавали:

$$\begin{vmatrix} 3.550 & -4.810 & 1.062 & 1.198 \\ -2.016 & 2.709 & 1.405 & -1.098 \\ -2.332 & 4.749 & -0.409 & -1.008 \\ 1.728 & -2.237 & 0.0677 & 1.442 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 10 & 20 \\ 30 & 15 \\ 50 & 25 \\ 70 & 5 \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} (3.55 \cdot 10 + (-4.81) \cdot 30 + 1.062 \cdot 50 + 1.198 \cdot 70) & (3.55 \cdot 20 + (-4.81) \cdot 15 + 1.062 \cdot 25 + 1.198 \cdot 5) \\ ((-2.016) \cdot 10 + 2.709 \cdot 30 + 1.405 \cdot 50 + (-1.098) \cdot 70) & ((-2.016) \cdot 20 + 2.709 \cdot 15 + 1.405 \cdot 25 + (-1.098) \cdot 5) \\ ((-2.332 \cdot 10) + (4.749 \cdot 30) + (-0.409 \cdot 50) + (-1.008 \cdot 70)) & ((-2.332 \cdot 20) + (4.749 \cdot 15) + (-0.409 \cdot 25) + (-1.008 \cdot 5)) \\ ((1.728 \cdot 10) + (-2.237 \cdot 30) + (0.0677 \cdot 50) + (1.442 \cdot 70)) & ((1.728 \cdot 20) + (-2.237 \cdot 15) + (0.0677 \cdot 25) + (1.442 \cdot 5)) \end{vmatrix}$$

$$= \begin{vmatrix} 28.16 & 31.39 \\ 54.5 & 29.95 \\ 28.14 & 9.33 \\ 54.495 & 9.91 \end{vmatrix}$$

Отже координати датчиків в сантиметрах становлять:

$$X_1 = 28.16, Y_1 = 31.39;$$

$$X_2 = 54.5, Y_2 = 29.95;$$

$$X_3 = 28.14, Y_3 = 9.33;$$

$$X_4 = 54.495, Y_4 = 9.91.$$

Вимірювання

Припустимо, що вихідні коди (табл. 2.2) системи становили при навантаженні гирею 500 грамів в точці $x = 40$ см, $y = 20$ см, а значення чутливостей датчиків в грам/код $S_1 = 200,08$; $S_2 = 192,74$; $S_3 = 193,13$; $S_4 = 196,13$.

Таблиця 2.2

Датчик 1	Датчик 2	Датчик 3	Датчик 4
328840	409582	336631	250941
355220	431882	364263	272635

1. Розраховуємо перетворення:

$$R_1 = \frac{355220 - 328840}{200,08} = 131.85 \text{ г}; R_2 = \frac{409582 - 431882}{192,74} = 115.70 \text{ г};$$

$$R_3 = \frac{364263 - 336631}{193,13} = 143.07 \text{ г}; R_4 = \frac{272635 - 250941}{196,13} = 110.61 \text{ г};$$

2. Розраховуємо суму перетворень:

$$G_0 = R_1 + R_2 + R_3 + R_4;$$

$$G_0 = 131,85 + 115,70 + 143,07 + 110,61 = 501,23 \text{ г.}$$

3. Розраховуємо координати:

$$X_0 = \frac{R_1}{G_0} \cdot X_1 + \frac{R_2}{G_0} \cdot X_2 + \frac{R_3}{G_0} \cdot X_3 + \frac{R_4}{G_0} \cdot X_4,$$

$$Y_0 = \frac{R_1}{G_0} \cdot Y_1 + \frac{R_2}{G_0} \cdot Y_2 + \frac{R_3}{G_0} \cdot Y_3 + \frac{R_4}{G_0} \cdot Y_4.$$

$$X_0 = \frac{131.85}{501,23} \cdot 28.16 + \frac{115.70}{501,23} \cdot 54.50 + \frac{143.07}{501,23} \cdot 28.14 + \frac{110.61}{501,23} \cdot 54.495$$

$$= 40.05 \text{ см};$$

$$Y_0 = \frac{131.85}{501,23} \cdot 31.39 + \frac{115.70}{501,23} \cdot 29.95 + \frac{143.07}{501,23} \cdot 9.33 + \frac{110.61}{501,23} \cdot 9.91 = 20.02 \text{ см.}$$

Отже, результат розрахунку становить вага дорівнює 501.23 г, а координати датчиків $x = 54.495$ см, $y = 20.020$ см.

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ

Експеримент є важливою складовою частиною наукових досліджень, в основі якого знаходиться поставлений дослід з точно врахованими умовами та умовами якими можна керувати. Для рішення задачі та наукового обґрунтування її достовірності була розроблена система експериментального дослідження процесу вимірювання координат центру мас.

Дослідження було проведено в лабораторних умовах на власноруч зібраній системі, яка складається з чотирьох тензодатчиків, що жорстко закріпленні на металевій основі, чотирьох аналого-цифрових перетворювачів, конвектора RS-485 в USB, а також зі скляної вантажоприймальної платформи на яку було нанесено координатну сітку.

Розроблена установка для дослідження представлено на рис. 3.1.

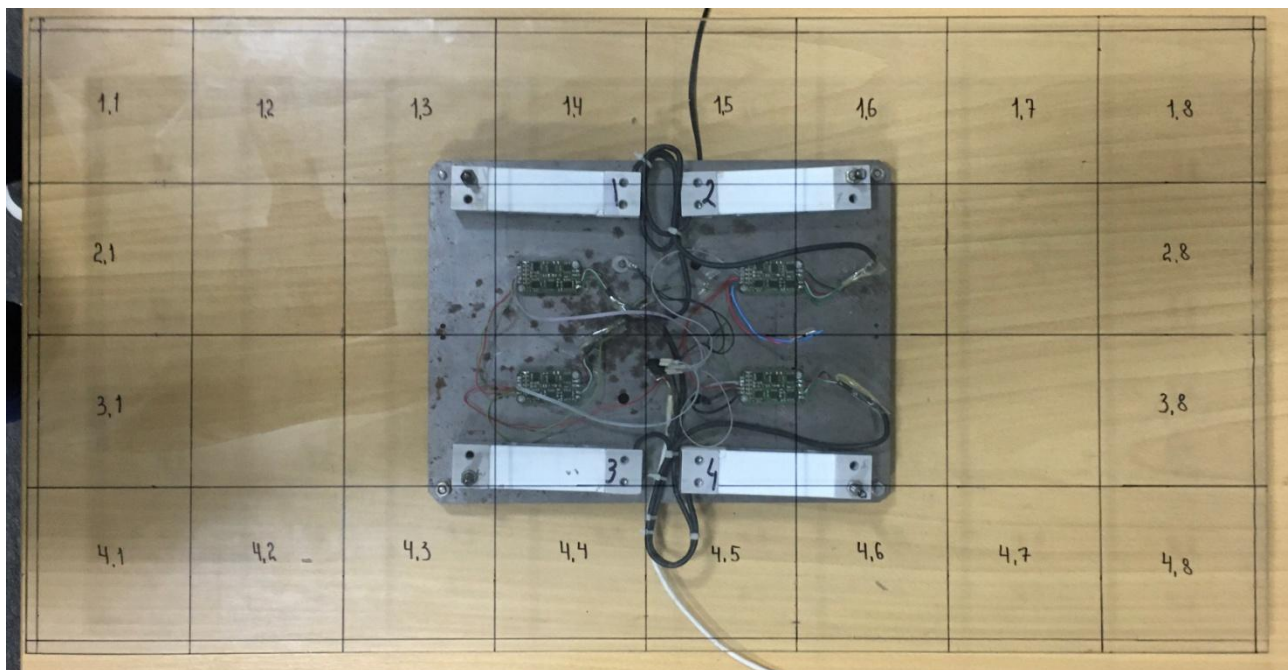


Рис. 3.1 – Установка дослідження

Схема підключення установки до ПК виглядає наступним чином: вихідна напруга U з тензодатчика надходить до аналого-цифрового перетворювача AD 105, далі передається інтерфейсом RS-485/422 до конвертору RS-485/USB після чого надходить до комп'ютера, де йде подальша програмна обробка.

3.1. Вибір засобів вимірювання

Головним у вимірювальній ланці системи є тензодатчик, таким чином для виконання перетворення навантаження був обраний датчик L6D ZemicUSA.

Датчик компанії ZemicUSA моделі L6D (рис. 3.2) є одно точкового паралелограмного типу і застосовується для виготовлення ваг та ваговимірювальних систем. Полімерна заливка елементів забезпечує надійну безпеку тензодатчика за IP65, володіє високими метрологічними характеристиками та виготовлений із алюмінієвого сплаву [20].



Рис. 3.2 – Тензодатчик "ZEMIC" L6D

Технічні характеристики датчика приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристики датчика

Характеристика	Одиниця вимірювання	L6D
Клас точності		C3
Робочий коефіцієнт передачі	мВ/В	2,0±0,2
Максимально число повірочних інтервалів		3000
Граничне перенавантаження	%FS	150
Гистерезис	%FS	0,01
Нелінійність	%FS	0,017
Повзучість	%FS	0,015
Вхідний опір	Ом	409±6
Вихідний опір	Ом	350±3
Опір ізоляції	МОм	≥5000
Балансування нуля	%FS	2,0
Температурне відхилення	%FS/10°C	0,017
Діапазон термокомпенсації	°C	-10...+40
Робочий діапазон температур	°C	-35...+65
Діапазон напруги живлення	В	5...12
Навантаження руйнування	%FS	300
Тип кабеля		4-жильний, екранований

Основні параметри датчика представленні на рис. 3.3

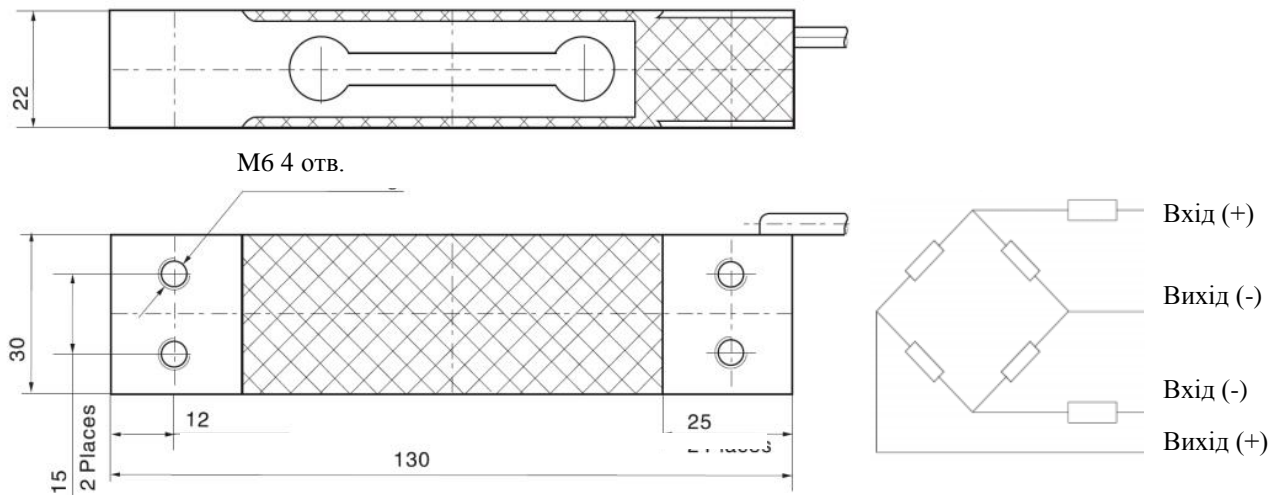


Рис.3.3 – Основні параметри тензодатчика

Не менш важливою складовою системи є аналого-цифровий перетворювач для цього був обраний АЦП AD 105. AD 105 (рис. 3.4) компанії НВМ призначений для цифрової обробки та передачі мережею сигналів від механічних датчиків. Він представляє собою двосторонню друковану плату до якої підключення датчика, живлення та послідовного інтерфейсу здійснюється пайкою до відповідних контактних майданчиків.

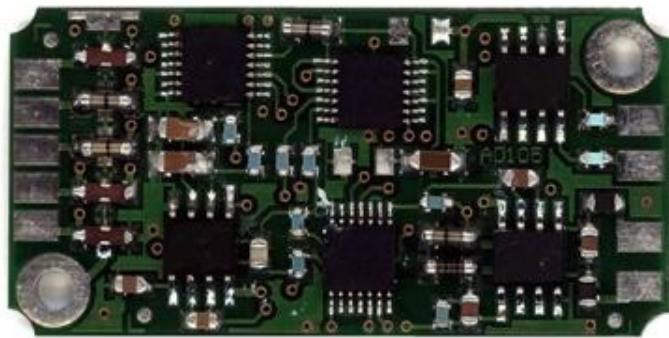


Рис. 3.4 – Аналого-цифровий перетворювач AD 105

Особливості:

- 4-х дротовий інтерфейс для повно мостових датчиків;
- Послідовний інтерфейс RS-485 2-х дротовий, навів-дуплексний, адресний діапазон 00...31;
- Роздільне калібрування датчиків і користувацькі характеристики;
- Цифрова фільтрація і масштабування вимірювального сигналу;

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

- Автоматичне відстеження нуля
- 1 портовий перемикач з гістерезисом.

Технічні характеристик перетворювача таблиця 3.2 [21].

Таблиця 3.2 – Характеристики перетворювача

Характеристика	Одиниця вимірювання	AD 105
Точність до $> 1.0 \mu V/d$	d	3000
Опір мосту, перетворювач	Ом	> 300
Збуджуюча напруга моста	В	5
Максимальний діапазон вимірювань	мВ/В	± 2.4
Нормативне значення	мВ/В	2
Вимірювання роздільності сигналу	Біт	20 (при 1 Гц)
Вимірювання швидкості (в залежності від вихідного формату і швидкості передачі даних)	Гц	100; 50; 25; 12; 6; 3; 2; 1;
Гранична частота цифрових фільтрів, регульована; на -3dB	Гц	8...0.05
Довжина кабелю між AED і комп'ютером до RS485	м	≤ 1000
Відхилення лінійності, пов'язане з значенням характеристик	%	± 0.0025
Послідовні інтерфейси		
Електричний рівень (RS-485, диференційний)	В	Нижній: $B-A < 0.35$ Верхній: $B-A > 0.35$
Швидкість передачі даних, регульована	Байт	1200; 2400; 4800; 9600
Максимальна напруга на контрольному виході	В	15
Максимальний струм на контрольному виході	мА	40 (при 6V), 22 (при 15V)
Робоча напруга	В	6..15
Струм	мА	≤ 45
Номинальний діапазон робочих температур	°C	-10...+40
Діапазон робочих температур	°C	-10...+50
Діапазон температур зберігання	°C	-25...+75
Розміри (ДхШхВ)	мм	45 x 22.5 x 7
Ступінь захисту		IP 00
Вага	г	50

Габаритні розміри плати та призначення виходів показані на рис. 3.5



Рис. 3.5. Параметри плати AD 105

В якості інтерфейсу передачі даних між тензодатчиками і комп'ютером використовується RS-485.

RS-485 – це один із найрозповсюджених стандартів фізичного зв'язку, що використовується для передачі між декількома пристроями за однією дводровою лінією зв'язку в напівдуплексному режимі.

Передача здійснюється по двом лініям А та В, що представляють собою виту пару. В основі інтерфейсу лежить принцип диференційної передачі даних, суть якої полягає в передачі одного сигналу по двом проводам. Тобто передача відбувається наступним чином по проводу умовно А іде оригінальний сигнал, а по іншому умовно В іде його інверсна копія, тобто якщо на одному дроту “1”, то на іншому “0”. Таким чином між двома дротами завжди виникає різниця потенціалів: при “1” вона додатня, а при “0” – від'ємна (рис. 3.6).

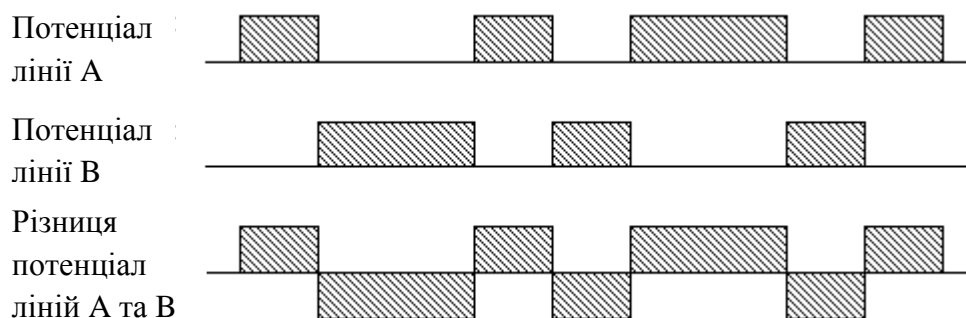


Рис. 3.6 – Суть диференційної передачі

У мережі може бути багато передавачів, оскільки вони можуть переключатись в режим прийому. Інтерфейс реалізовано в мікросхемах ST485, MAX485. Кількість пристроїв підключених до одної лінії інтерфейсу, залежить від опору

приймачів, за стандартом повинно бути більше або рівне 12 кОм [22, 23]. Повні характеристики інтерфейсу представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Характеристики RS-485

Стандартні параметри інтерфейсів	RS-485
Допустима кількість передавачів / приймачів	32 / 32
Максимальна довжина кабелю	1200 м
Максимальна швидкість зв'язку	10 Мбіт/с
Діапазон напруг "1" передавача	+1.5...+6 В
Діапазон напруг "0" передавача	-1.5...-6 В
Діапазон синфазного напруги передавача	-1...+3 В
Допустимий діапазон напруг приймача	-7...+12 В
Граничний діапазон чутливості приймача	±200 мВ
Максимальний струм короткого замикання драйвера	250 мА
Допустимий опір навантаження передавача	54 Ом
Вхідний опір приймача	12 кОм
Максимальний час наростання сигналу передавача	30% біта

У якості перетворювача інтерфейсу RS-485 до USB використовується конвектор КИМ-USB-RS485 КМКС.

Конвертер KIM-USB-RS485 КМКС (рис. 3.7) дає змогу підключити системи або пристрої з інтерфейсом RS485 до USB порту комп'ютера. Конвертер забезпечує повну гальванічну розв'язку ланцюгів і не потребує зовнішнього джерела живлення – напруга живлення здійснюється від USB порту. Передбачена можливість роботи конвертера в режимі з «ЕХО» (передача повертається на прийом) і без «ЕХО» (передача не повертається на прийом).

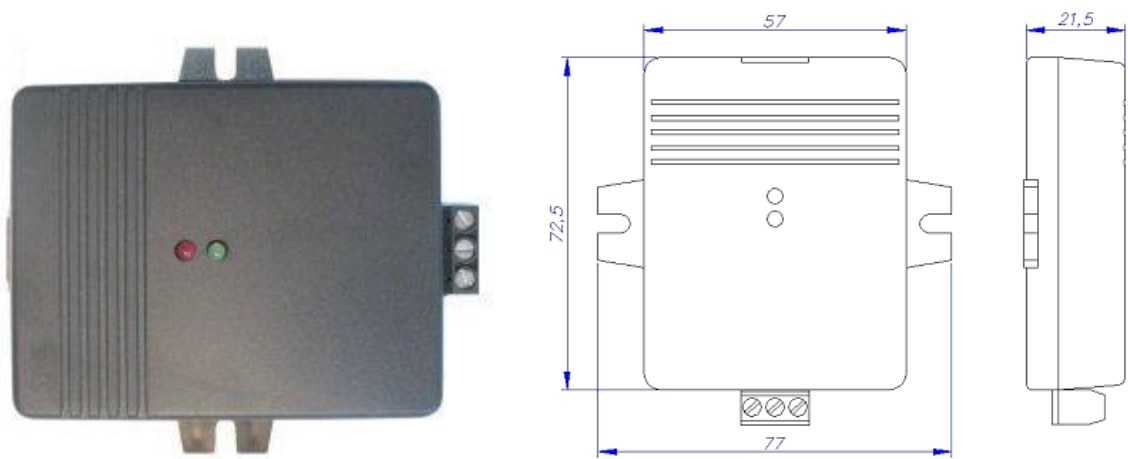


Рис. 3.7

Основні характеристики:

- Швидкість передачі даних від 300 байт до 1.0 Мбайта (стандартний ряд швидкостей);
- Живлення від USB порту (не потребує зовнішнього джерела живлення);
- Струм споживання не більше 100 мА;
- Повна гальванічна розв'язка (до 1000В);
- Індикація прийому / передачі;
- Діапазон робочих температур від - 40 С° до + 85 С° [24].

В якості платформи для зважування було обрано скляну поверхню (рис. 3.8) на якій було нанесено координатну сітку для легкості проведення експерименту. Розмір кожної клітинки 100 на 100 мм, всього 32 клітинки таким чином вимірювальна поверхня займає 800 на 400 мм.

На залізній платформі (1 на рис. 3.9) було закріплено чотири тензодатчики “ZEMIC” моделі L6D (2 на рис. 3.9) та чотири аналогово-цифрових перетворювачів HBM AD 105 (3 на рис. 3.9). Під номером 4 на рис. 3.9 зображення інтерфейсний кабель, під номером 5 кабель живлення системи.

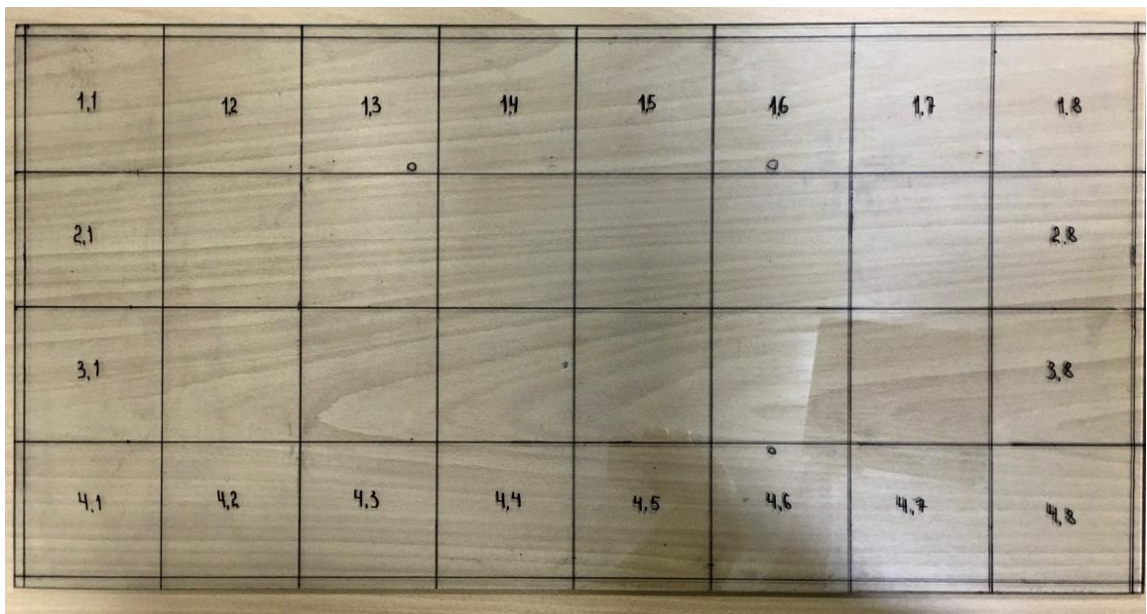


Рис. 3.8 – Платформа для зважування

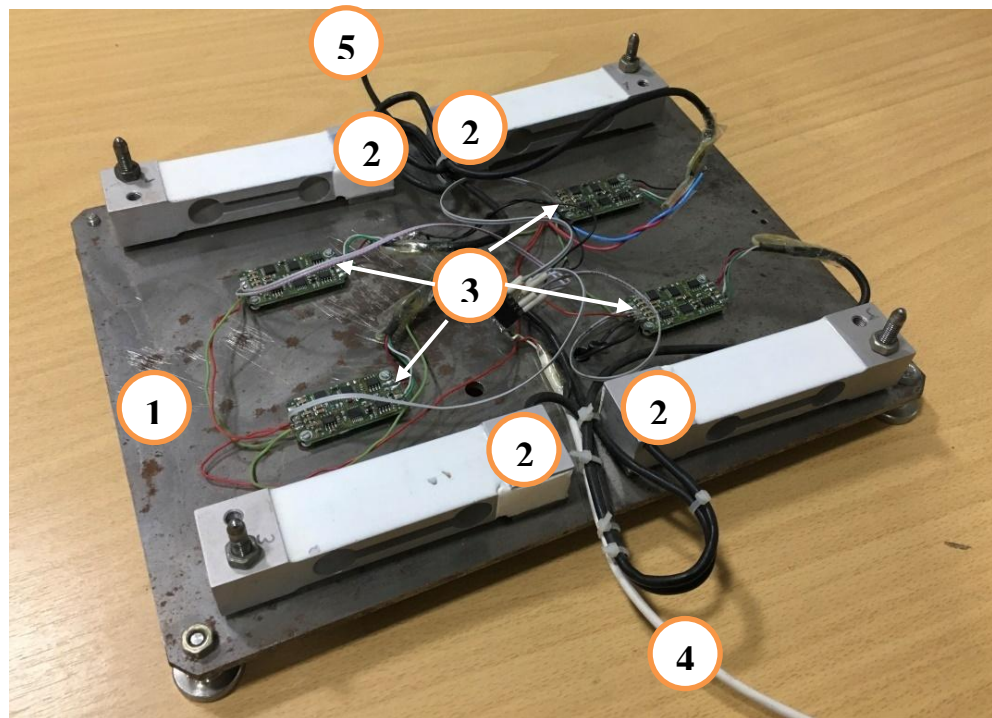


Рис. 3.9 – Вимірювальна платформа

3.2. Опис програми для проведення експерименту

Для автоматизації проведення експериментів в тому числі градуювання датчиків та калібрування системи була розроблена програма на високорівневій мові програмування загального призначення Python. Для побудови програми було використано відкриті бібліотеки Tkinter, sys, NumPy, xlwt. Головне вікно програми представлено на рис. 3.10.

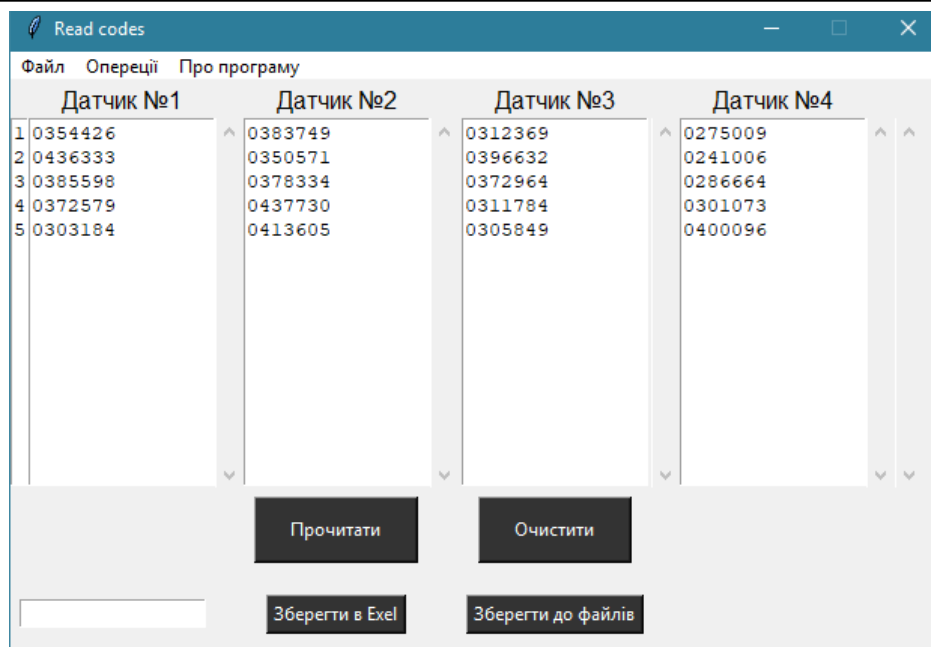


Рис. 3.10 – Головне вікно програми

Інтерфейс головного вікна програми складається із 4 текстових полів 4 кнопок та одного поля вводу. Після під'єднання системи до комп'ютера та налаштування порту (здійснюється при першому під'єднанні) вводу/вивода можна приступати до роботи з програмою. Для отримання поточних кодів потрібно натиснути кнопку “Прочитати”, тоді у текстових полях з'являться коди вантажу з датчиків, далі після проведення читання кодів, їх можна експортувати до тестового файлу (натиснути “Зберегти до файлів”) або у файл Microsoft Excel (натиснути “Зберегти в Excel”).

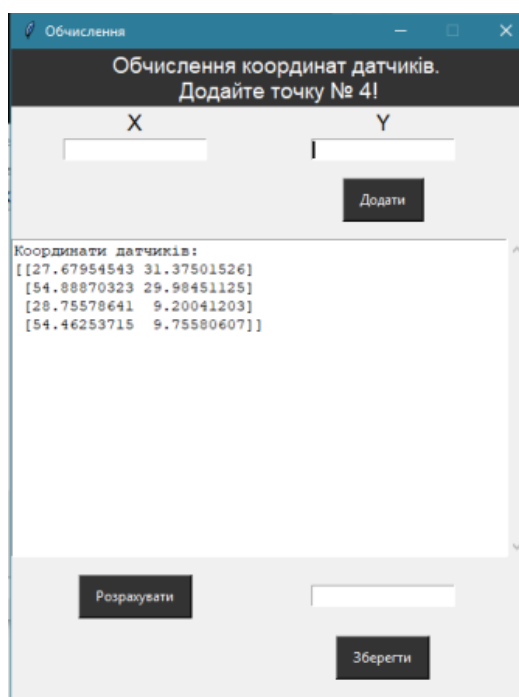


Рис. 3.11 – Вікно розрахунків координат датчиків

За прочитаними кодами можна провести розрахунок координат центру датчиків натиснувши в меню Операції → Знайти координати. Після чого відкриється вікно (рис. 3.11) де потрібно ввести координати прикладання навантаження у відповідній координатній площині у поля “X” та “Y”, далі натиснути кнопку “Розрахувати” і потім у текстовому полі з’являться координати датчиків.

Координати датчиків потрібні для вирішення задачі вимірювання, виходячи із математичної моделі (2.4), яка наведена у другому розділі.

3.3. Градування датчиків

Для градування датчиків було проведено зважування гирок під час проходження переддипломної практик на ДП “Укрметртестстандарті” для уточнення їх номіналів. Уточнені номінали гирок представленні у таблиці 3.4

Таблиця 3.4 – Номінали гирок

№п/п	Вага, г	№ п/п	Вага, г
1	275.437	8	275.716
2	275.672	9	275.749
3	275.801	10	275.594
4	275.792	11	275.691
5	274.453	12	275.244
6	274.888	13	274.911
7	275.210	14	275.790

Самі номінальні гирьки, зображено на рис. 3.12.



Рис. 3.12 – калібрувальні гирі

Градуювання було проведено за допомогою розробленого програмного забезпечення і відбувалось наступним чином: номінальними гирьками по черзі навантажували і розвантажували датчик, процедура була повторена три рази і була проведена для кожного датчика. Вихідні дані експерименту були експортовані з програми до таблиці Microsoft Excel, де вони в подальшому були оброблені. Результати розрахунків похибок вимірювання і градуювання датчиків представлено нижче.

В таблиці 3.5 зображено навантаження, яке було прикладене до першого датчика, та вихідні сигнали при першому, другому і третьому досліді.

Таблиця 3.5

Навантаження, г	Вихідний сигнал при 1-ому досліді, код	Вихідний сигнал при 2-ому досліді, код	Вихідний сигнал при 3-ому досліді, код
1	2	3	4
0	89064	89056	89062
275,437	144176	144167	144176
551,109	199356	199348	199361
826,909	254534	254511	254505
1102,701	309724	309684	309708
1377,154	364640	364612	364592
1652,042	419645	419617	419638
1927,252	474681	474748	474708
2202,969	529877	529803	529880
2478,718	585014	584941	585033
2754,312	639915	640052	640178
3030,003	695264	695244	695401
3305,247	750542	750402	750359
3305,247	750304	750401	750335
3030,003	695287	695244	695262
2754,312	640241	640094	640109
2478,718	585020	585009	584977
2202,969	529846	529853	529867
1927,252	474619	474762	474670
1652,042	419637	419640	419522
1377,154	364639	364643	364565
1102,701	309688	309677	309675
826,909	254519	254526	254429
551,109	199331	199320	199237
275,437	144170	144149	144074

1	2	3	4
0	89059	89055	88959

На графіку (рис. 3.13) нанесено три експериментальні дослідження та побудована лінія тренду, яка використовується для апроксимації даних за методом найменших квадратів.

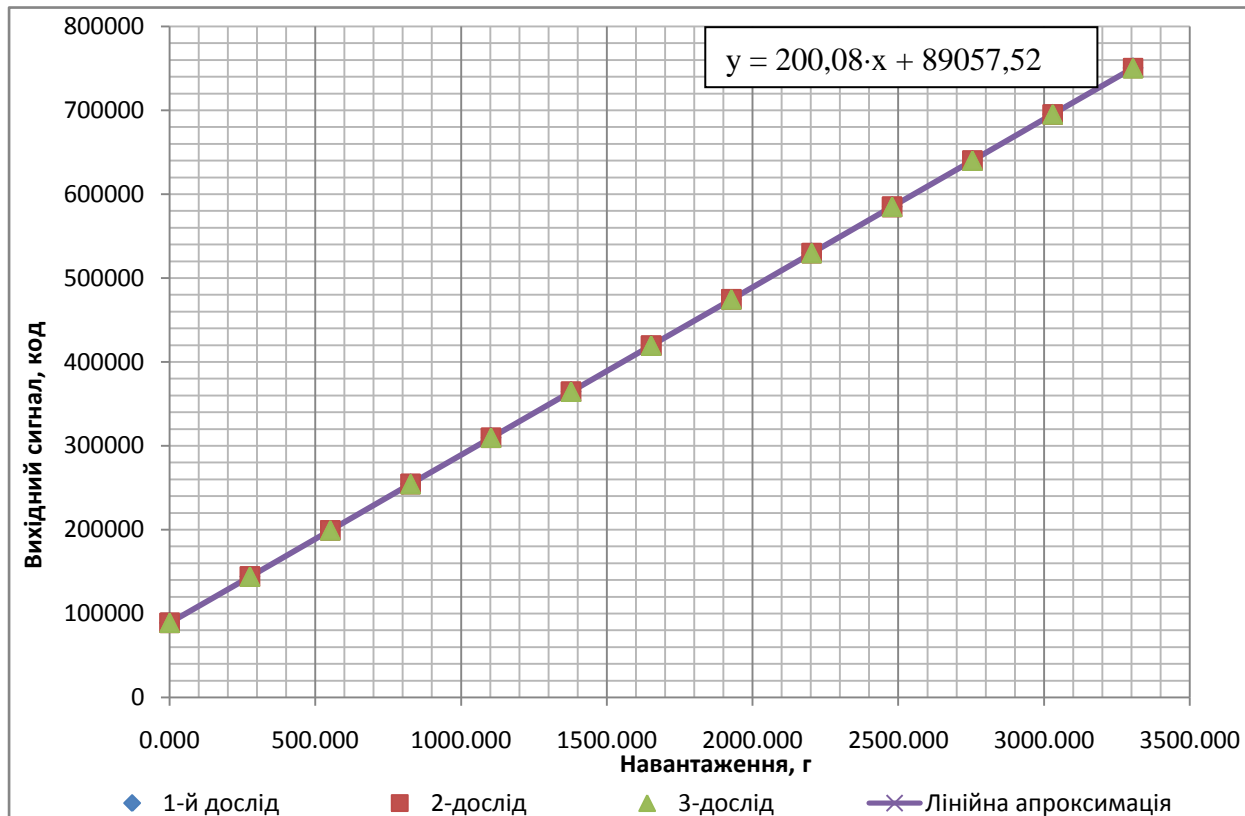


Рис. 3.13 – Градувальна характеристика першого датчика

Далі за отриманими даними був проведений регресійний аналіз та встановлені похибки датчика при кожному досліді. Значення похибок (таблиця 3.6) та графік похибок (рис. 3.14) представлено нижче.

Таблиця 3.6 – Значення похибок першого датчика

Навантаження, г	Похибка 1-го досліді, %	Похибка 2-го досліді, %	Похибка 3-го досліді, %
1	2	3	4
0	0,00000	-0,00121	-0,00030
275,437	0,00033	-0,00103	0,00033
551,109	0,00382	0,00261	0,00458
826,909	0,00312	-0,00036	-0,00127
1102,701	0,00450	-0,00154	0,00208
1377,154	0,00495	0,00071	-0,00231
1652,042	0,00571	0,00147	0,00465

1	2	3	4
1927,252	0,00139	0,01152	0,00548
2202,969	0,00596	-0,00523	0,00642
2478,718	0,00062	-0,01042	0,00350
2754,312	-0,01607	-0,01501	0,00405
3030,003	-0,00724	-0,01026	0,01348
3305,247	-0,00622	0,00285	-0,00365
3305,247	-0,01197	0,00270	-0,00728
3030,003	-0,00376	-0,01026	-0,00754
2754,312	0,01357	-0,00866	-0,00639
2478,718	0,00153	-0,00013	-0,00497
2202,969	0,00128	0,00233	0,00445
1927,252	-0,00798	0,01364	-0,00027
1652,042	0,00450	0,00495	-0,01289
1377,154	0,00480	0,00540	-0,00639
1102,701	-0,00094	-0,00260	-0,00291
826,909	0,00085	0,00191	-0,01276
551,109	0,00004	-0,00162	-0,01417
275,437	-0,00058	-0,00375	-0,01509
0	-0,00076	-0,00136	-0,00076

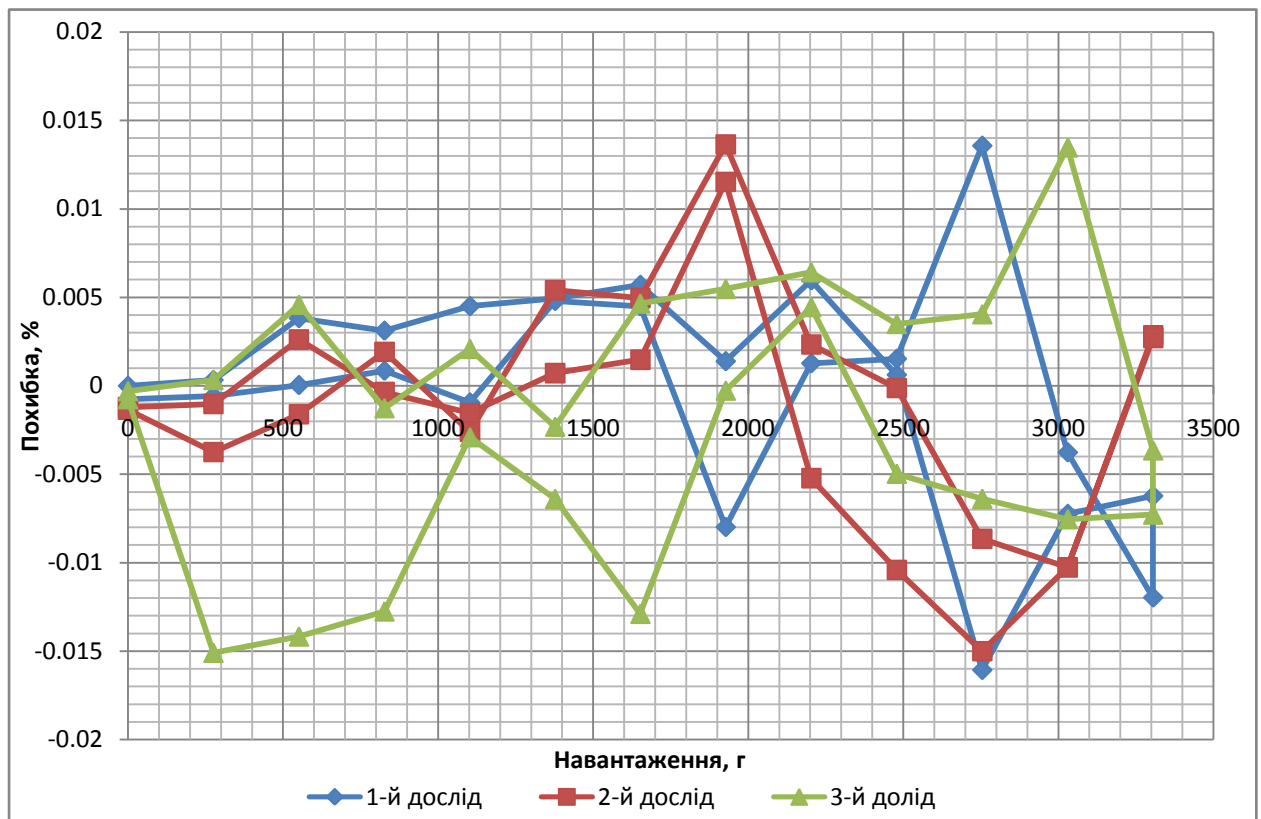


Рис. 3.14 – Значення похибок

В таблиці 3.7 зображено навантаження, яке було прикладене до другого датчика та вихідні сигнали при першому, другому і третьому досліді.

Навантаження, г	Вихідний сигнал при 1-ому досліді, код	Вихідний сигнал при 2-ому досліді, код	Вихідний сигнал при 3-ому досліді, код
0	264494	264493	264500
275,437	317600	317589	317597
551,109	370724	370728	370740
826,909	423884	423889	423917
1102,701	477050	477059	477104
1377,154	529962	529945	529977
1652,042	582909	582961	582935
1927,252	635976	635992	636018
2202,969	689096	689139	689171
2478,718	742264	742198	742285
2754,312	795429	795388	795363
3030,003	848614	848474	848455
3305,247	901784	901613	901457
3305,247	901673	901483	901327
3030,003	848712	848401	848579
2754,312	795397	795309	795356
2478,718	742225	742260	742328
2202,969	689140	689100	689059
1927,252	635942	635986	636033
1652,042	582967	582922	582977
1377,154	529974	530024	529957
1102,701	477064	477072	477074
826,909	423915	423906	423917
551,109	370750	370742	370751
275,437	317587	317581	317601
0	264486	264483	264499

На графіку (рис. 3.15) нанесено три експериментальні дослідження та побудована лінія тренду, яка використовується для апроксимації даних за методом найменших квадратів.

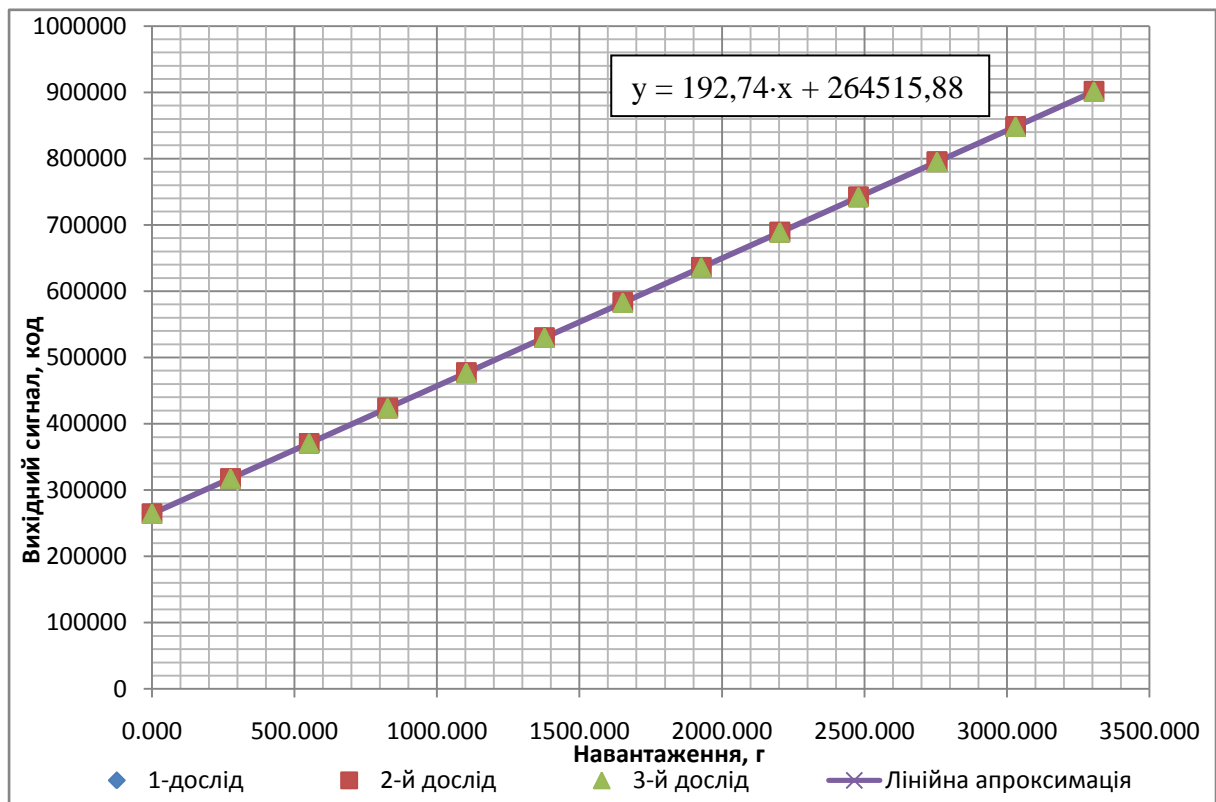


Рис. 3.15 – Градувальна характеристика другого датчика

Далі за отриманими даними був проведений регресійний аналіз та обчисленні похибки датчика при кожному досліді. Значення похибок (таблиця 3.8) та графік похибок (рис. 3.16) представлено нижче.

Таблиця 3.8

Навантаження, г	Похибка 1-го досліді, %	Похибка 2-го досліді, %	Похибка 3-го досліді, %
1	2	3	4
0	0,00000	-0,00016	0,00094
275,437	0,00280	0,00107	0,00233
551,109	0,00131	0,00194	0,00382
826,909	0,00157	0,00236	0,00675
1102,701	0,00305	0,00446	0,01152
1377,154	0,00515	0,00248	0,00750
1652,042	-0,00040	0,00776	0,00368
1927,252	0,00313	0,00564	0,00972
2202,969	-0,00033	0,00642	0,01144
2478,718	0,00275	-0,00760	0,00605
2754,312	0,01004	0,00361	-0,00031
3030,003	0,01756	-0,00441	-0,00739
3305,247	0,03623	0,00939	-0,01508
3305,247	0,01881	-0,01101	-0,03548
3030,003	0,03293	-0,01587	0,01206
2754,312	0,00502	-0,00879	-0,00141

1	2	3	4
2478,718	-0,00337	0,00212	0,01279
2202,969	0,00657	0,00030	-0,00614
1927,252	-0,00220	0,00470	0,01207
1652,042	0,00871	0,00164	0,01027
1377,154	0,00703	0,01488	0,00437
1102,701	0,00525	0,00650	0,00682
826,909	0,00644	0,00502	0,00675
551,109	0,00539	0,00413	0,00554
275,437	0,00076	-0,00018	0,00296
0	-0,00126	-0,00173	0,00078

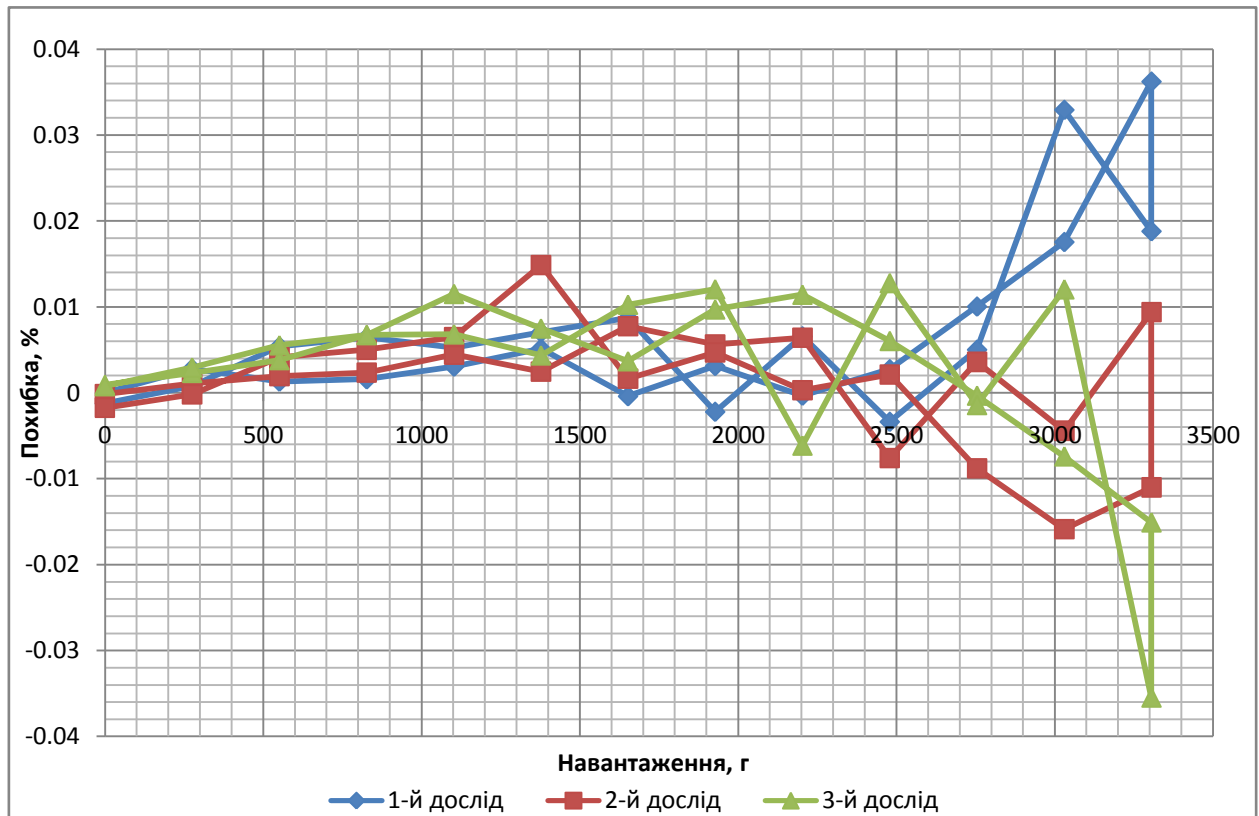


Рис. 3.16 – Графік похибок другого датчика

В таблиці 3.9 зображено навантаження, яке було прикладене до третього датчика та вихідні сигнали при першому, другому і третьому досліді.

Таблиця 3.9

Навантаження, г	Вихідний сигнал при 1-ому досліді, код	Вихідний сигнал при 2-ому досліді, код	Вихідний сигнал при 3-ому досліді, код
1	2	3	4
0	151422	151399	151401
275,437	204629	204611	204609
551,109	257866	257873	257864
826,909	311139	311136	311134

1	2	3	4
1102,701	364413	364414	364414
1377,154	417428	417428	417393
1652,042	470506	470517	470506
1927,252	523661	523632	523671
2202,969	576892	576927	576909
2478,718	630159	630144	630151
2754,312	683372	683403	683363
3030,003	736617	736576	736604
3305,247	789770	789759	789785
3305,247	789745	789651	789693
3030,003	736629	736603	736603
2754,312	683351	683360	683355
2478,718	630157	630143	630138
2202,969	576901	576865	576890
1927,252	523672	523650	523704
1652,042	470506	470496	470539
1377,154	417424	417434	417424
1102,701	364397	364415	364435
826,909	311132	311142	311131
551,109	257870	257869	257866
275,437	204605	204608	204608
0	151400	151400	151411

На графіку (рис. 3.17) нанесено три експериментальні дослідження та побудована лінія тренду, яка використовується для апроксимації даних за методом найменших квадратів.

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата		

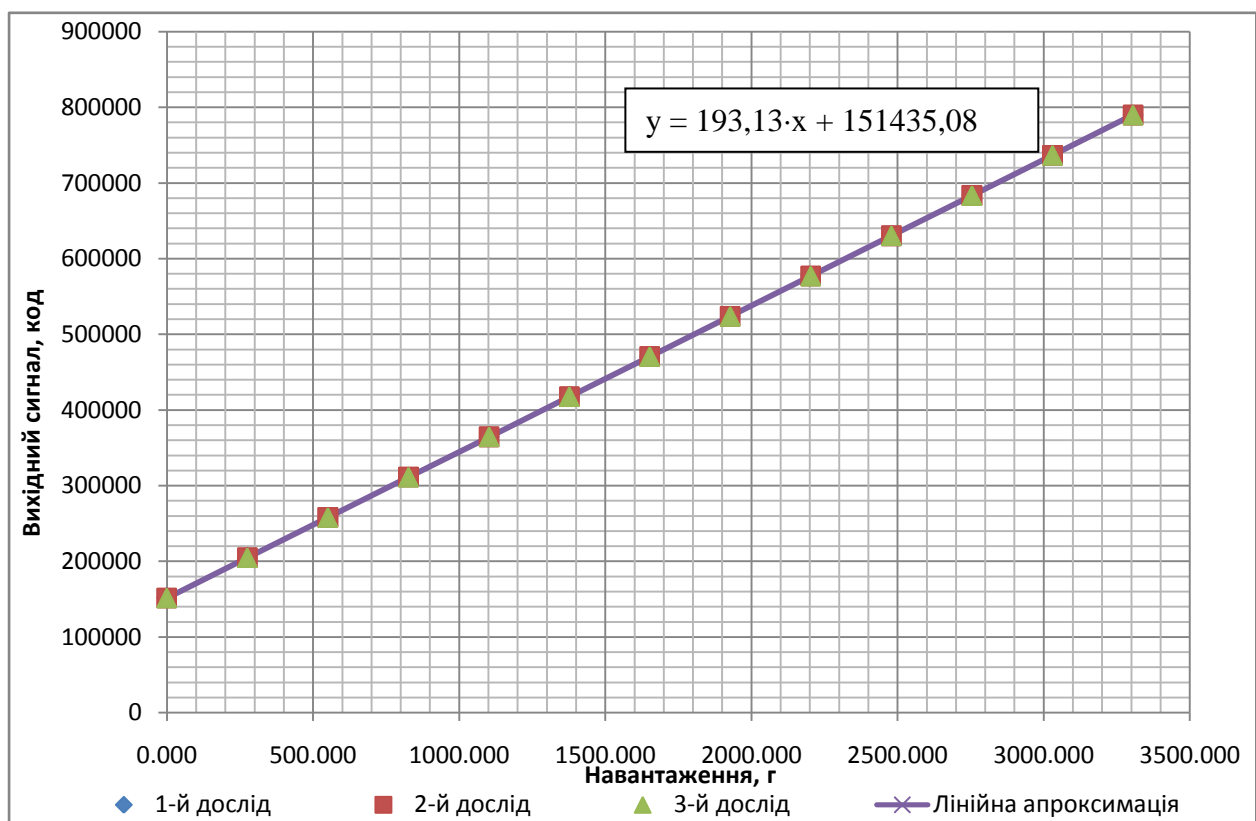


Рис. 3.17 – Градувальна характеристика третього датчика

Далі за отриманими даними був проведений регресійний аналіз та обчисленні похибки датчика при кожному досліді. Значення похибок (таблиця 3.10) та графік похибок (рис. 3.18) представлено нижче.

Таблиця 3.10

Навантаження, г	Похибка 1-го дослід, %	Похибка 2-го дослід, %	Похибка 3-го дослід, %
1	2	3	4
0	0	-0,00360	-0,00329
275,437	0,00196	-0,00086	-0,00117
551,109	0,00150	0,00259	0,00118
826,909	0,00278	0,00231	0,00200
1102,701	0,00450	0,00465	0,00465
1377,154	0,00613	0,00613	0,00065
1652,042	0,00449	0,00621	0,00449
1927,252	0,00515	0,00061	0,00672
2202,969	0,00241	0,00789	0,00507
2478,718	0,00432	0,00197	0,00306
2754,312	0,00244	0,00730	0,00103
3030,003	0,00267	-0,00375	0,00063
3305,247	0,00200	0,00028	0,00435
3305,247	-0,00192	-0,01664	-0,01006
3030,003	0,00455	0,00048	0,00048

1	2	3	4
2754,312	-0,00085	0,00056	-0,00022
2478,718	0,00400	0,00181	0,00103
2202,969	0,00382	-0,00182	0,00209
1927,252	0,00687	0,00343	0,01189
1652,042	0,00449	0,00292	0,00966
1377,154	0,00550	0,00707	0,00550
1102,701	0,00199	0,00481	0,00794
826,909	0,00169	0,00325	0,00153
551,109	0,00212	0,00197	0,00150
275,437	-0,00180	-0,00133	-0,00133
0	-0,00345	-0,00345	-0,00172

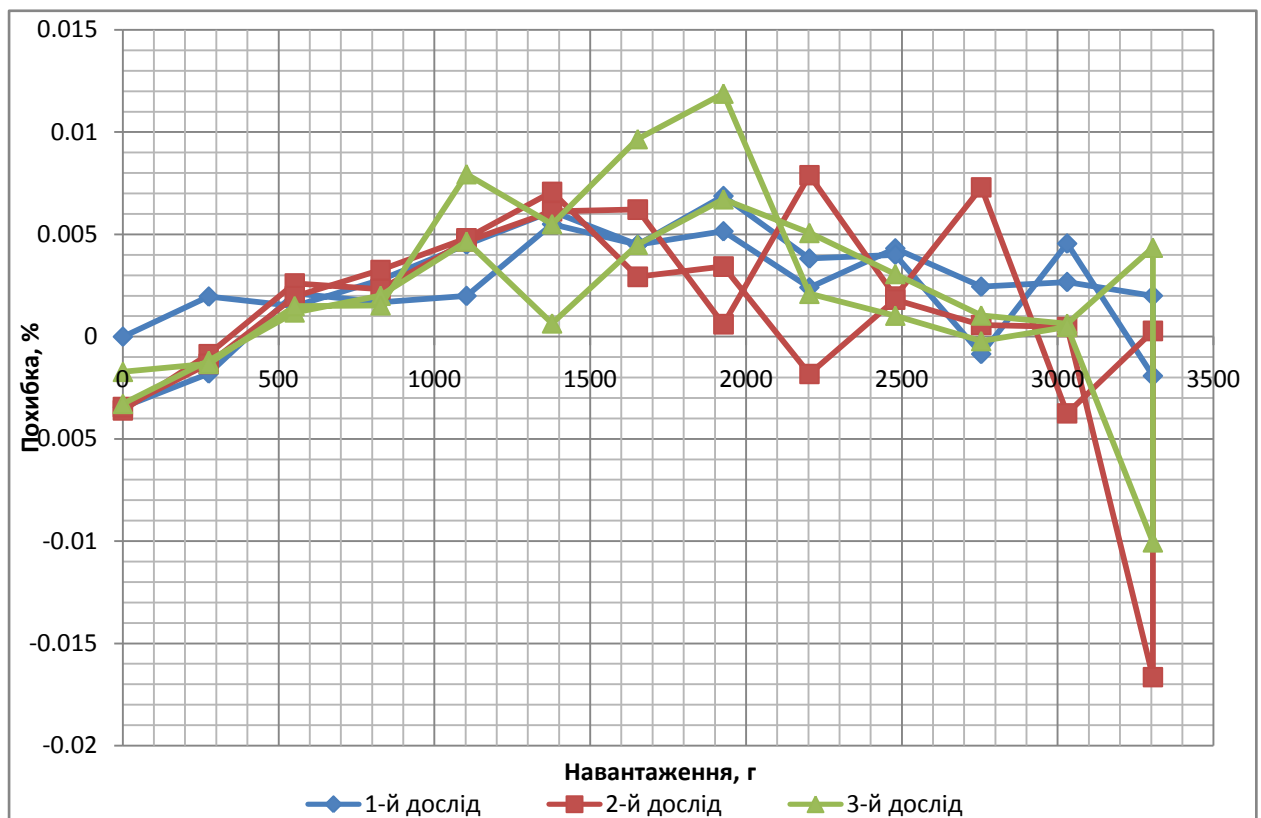


Рис. 3.18 – Похибка третього датчика

В таблиці 3.11 зображено навантаження, яке було прикладене до третього датчика та вихідні сигнали при першому, другому і третьому досліді.

Таблиця 3.11

Навантаження, г	Вихідний сигнал при 1-ому досліді, код	Вихідний сигнал при 2-ому досліді, код	Вихідний сигнал при 3-ому досліді, код
1	2	3	4
0	43700	43700	43699
275,437	97837	97831	97828

1	2	3	4
551,109	151970	151980	152000
826,909	206180	206173	206175
1102,701	260375	260364	260352
1377,154	314280	314276	314265
1652,042	368267	368265	368261
1927,252	422320	422316	422328
2202,969	476488	476487	476489
2478,718	530639	530645	530648
2754,312	584791	584837	584817
3030,003	638976	638932	638941
3305,247	693000	692963	692911
3305,247	693028	693117	693161
3030,003	639101	638940	638868
2754,312	584755	584811	584791
2478,718	530670	530657	530667
2202,969	476505	476458	476509
1927,252	422355	422300	422346
1652,042	368277	368277	368298
1377,154	314281	314272	314314
1102,701	260339	260350	260342
826,909	206163	206178	206168
551,109	151970	151958	151982
275,437	97819	97805	97826
0,000	43695	43701	43700

На графіку (рис. 3.19) нанесено три експериментальні дослідження та побудована лінія тренду, яка використовується для апроксимації даних за методом найменших квадратів.

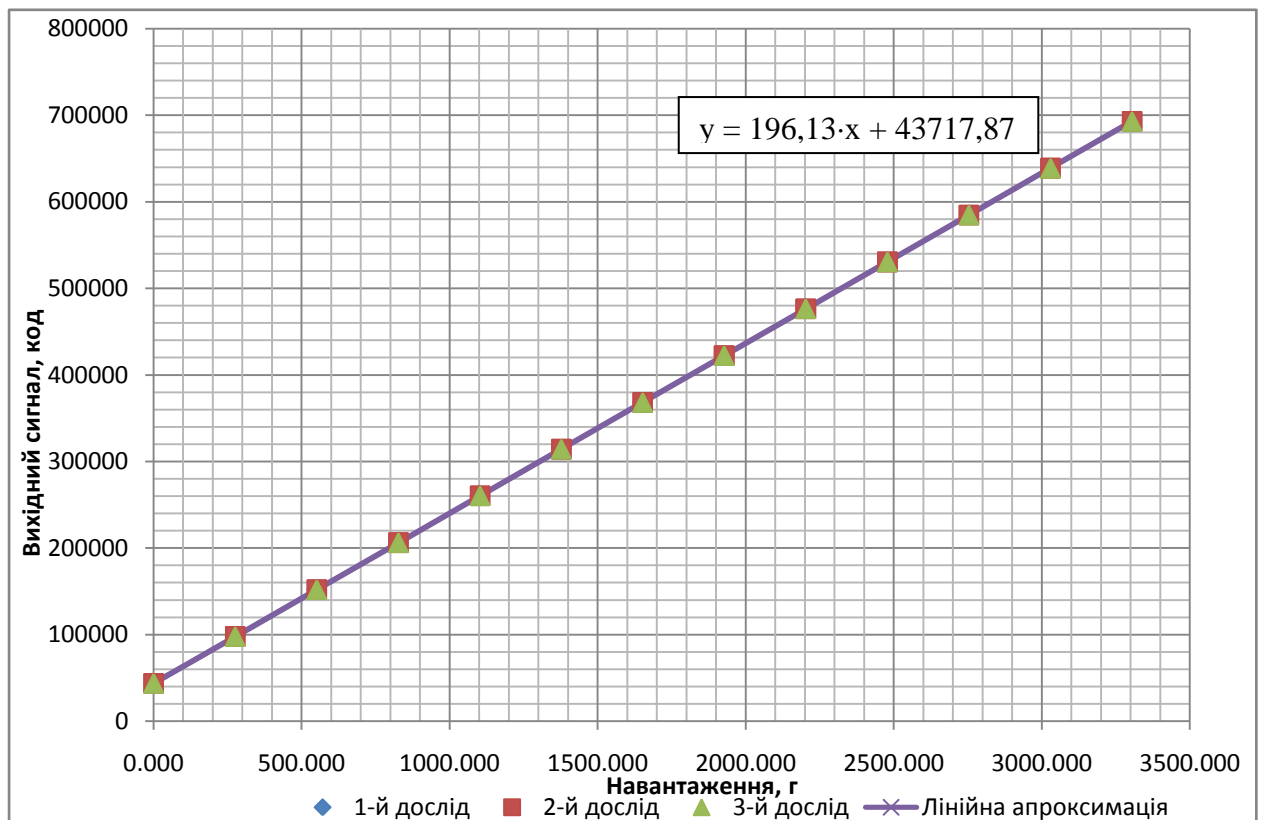


Рис. 3.20 – Градувальна характеристика четвертого датчика

Далі за отриманими даними був проведений регресійний аналіз та обчисленні похибки датчика при кожному досліді. Значення похибок (таблиця 3.12) та графік похибок (рис. 3.21) представлено нижче.

Таблиця 3.12

Навантаження, г	Похибка 1-го дослід, %	Похибка 2-го дослід, %	Похибка 3-го дослід, %
1	2	3	4
0	0,00000	0,00000	-0,00015
275,437	0,00421	0,00329	0,00283
551,109	0,00069	0,00223	0,00531
826,909	0,00514	0,00406	0,00437
1102,701	0,00754	0,00585	0,00400
1377,154	0,00578	0,00516	0,00347
1652,042	0,00350	0,00319	0,00257
1927,252	0,00162	0,00101	0,00285
2202,969	0,00215	0,00200	0,00230
2478,718	-0,00093	-0,00001	0,00046
2754,312	0,00082	0,00791	0,00483
3030,003	0,00474	-0,00203	-0,00065
3305,247	-0,00262	-0,00831	-0,01632
3305,247	0,00170	0,01540	0,02218
3030,003	0,02400	-0,00080	-0,01189

1	2	3	4
2754,312	-0,00472	0,00390	0,00082
2478,718	0,00384	0,00184	0,00338
2202,969	0,00477	-0,00247	0,00538
1927,252	0,00701	-0,00146	0,00563
1652,042	0,00504	0,00504	0,00827
1377,154	0,00593	0,00454	0,01101
1102,701	0,00200	0,00369	0,00246
826,909	0,00252	0,00483	0,00329
551,109	0,00069	-0,00116	0,00254
275,437	0,00144	-0,00071	0,00252
0	-0,00077	0,00015	0,00000

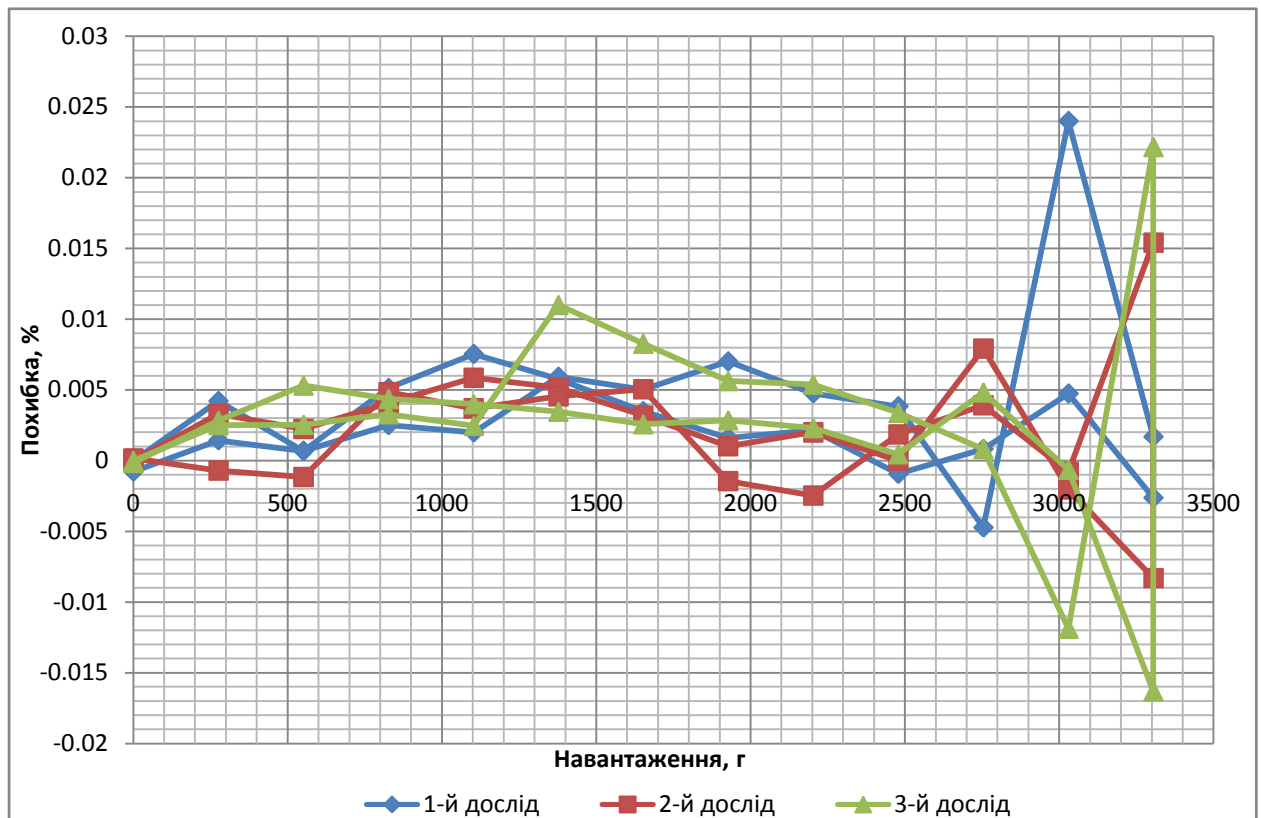


Рис. 3.21 – Похибка четвертого датчика

3.4. Розрахунок похибок датчика

Основний теоретичний розрахунок похибки датчика визначається окремими складовими. Для тензорезисторного датчика характерними є наступні складові: не лінійність γ_H , гістерезис γ_T , нестабільність γ_{CT} , температурна похибка чутливості β , часова похибка γ_B , температурна похибка нуля α , похибка тарування γ_T , похибка від зміни струму γ_i – похибка неідентичності роботи на постійному та змінному струмі, кабельна похибка γ_K , похибка нестабільності джерела живлення γ_u .

Вище перераховані похибки можна розглядати як випадкові величини, тому основну похибку можна розрахувати як геометричну суму складових.

Для тензорезисторного датчика притаманні такі значення похибок:

$$\delta = \sqrt{\gamma_H^2 + \gamma_T^2 + \gamma_{CT}^2 + \beta^2 + \alpha^2 + \gamma_B^2 + \gamma_T^2 + \gamma_K^2 + \gamma_i^2 + \gamma_u^2}.$$

Ці похибки є наслідком існуючої технології виготовлення, характеристиками матеріалу та точністю технологічного обладнання.

Враховуючи що температурний діапазон роботи датчика є достатньо вузьким, прийmemo температурну похибку: $\beta = \alpha = 0.02\%$.

Для тензорезисторного датчика притаманні такі значення похибок:

$$\gamma_H = \gamma_T = 0,02\%; \quad \gamma_{CT} = 0,015\%; \quad \gamma_T = 0,01\%;$$

Враховуючи, що ємнісний та індуктивний опір тензорезистора вибраної конструкції є мізерно малим до частоти живлення 50 кГц. Тому прийmemo: $\gamma_i = 0.01\%$

Похибка нестабільності джерела живлення: $\gamma_u = 0.03\%$

Розрахуємо основну похибку згідно формули:

$$\delta =$$

$$\sqrt{0,02^2 + 0,02^2 + 0,015^2 + 0,02^2 + 0,02^2 + 0,03^2 + 0,01^2 + 0,01^2 + 0,03^2} = 0,01\%.$$

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		67

3.5. Ідентифікація (калібрування) системи

Для розкриття невизначеності математичної моделі (2.3) приведеної у розділі 2 потрібно провести чотири експериментальні навантаження у координатній площині, яка зв'язана із сило вимірювальними перетворювачами при чому при кожному навантаженні змінювати точку прикладання.

Тобто методика калібрування виглядала наступним чином:

- 1) Читання з тензодатчиків початкових вихідних кодів ненавантаженої платформи;
- 2) Навантаження платформи мірою ваги в точках з відповідними координатами;
- 3) Фіксація значень координат розташування міри та читання вихідних кодів з чотирьох датчиків;
- 4) Визначення із системи восьми координат (X_i, Y_i).

Обчислення координат здійснювалося розробленим програмним продуктом (текст програми представлено в додатку А).

Таким чином було прикладене навантаження в чотирьох точках, як показано на рисунку 3.22.

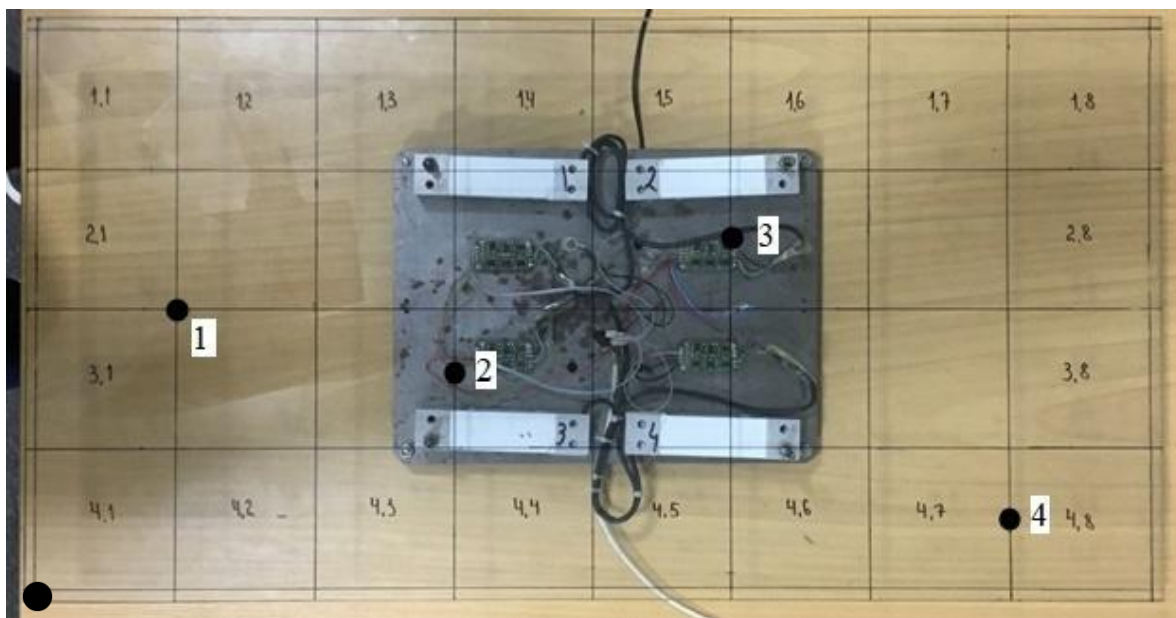


Рис. 3.22 – Схема прикладання точок

Оскільки розмір кожної клітинки 10 на 10 см і за початок координат було обрано лівий нижній кут, то відповідно точки прикладання навантаження мали

координати: точка 1 – $x = 10$, $y = 20$; точка 2 – $x = 30$, $y = 15$; точка 3 – $x = 50$, $y = 25$; точка 4 – $x = 70$, $y = 5$; Навантаження здійснювалося гіркою номінал якої становив 500 г. При цьому вихідні коди датчиків мали значення, які представленні в таблиці 3.13.

Таблиця 3.13

Координати прикладання		Датчик 1	Датчик 2	Датчик 3	Датчик 4
X	Y				
без навантаження		326160	411675	340088	247848
10	20	408413	378355	424139	213911
30	15	357119	406324	399959	260341
50	25	344059	465932	338856	274571
70	5	275212	440590	331983	375124

Розрахунки проведені в програмі представлені нижче:

Коди нулів:

[326160.0, 411675.0, 340088.0, 247848.0]

Матриця кодів навантаження:

[[408413. 378355. 424139. 213911.]

[357119. 406324. 399959. 260341.]

[344059. 465932. 338856. 274571.]

[275212. 440590. 331983. 375124.]]

Матриця без зсуву нуля:

[[82253. -33320. 84051. -33937.]

[30959. -5351. 59871. 12493.]

[17899. 54257. -1232. 26723.]

[-50948. 28915. -8105. 127276.]]

Матриця реакцій датчиків:

[[411.10007467 -172.83542072 435.1141369 -172.70164773]

[154.73292417 -27.75637264 309.93942357 63.57549828]

[89.45911075 281.43851807 -6.37780177 135.99039786]

[-254.63784426 149.98608014 -41.95785987 647.69351787]]

Сума реакцій датчика при i-ому навантаженні:

[500.67714311909003, 500.49147337444487, 500.51022490409287,
501.08389387509663]

Нормалізована матриця:

[[0.82108816 -0.34520334 0.86905133 -0.34493615]
[0.30916196 -0.05545823 0.61927014 0.12702614]
[0.17873583 0.56230323 -0.0127426 0.27170354]
[-0.50817407 0.29932329 -0.0837342 1.29258499]]

Зворотня матриця:

[[3.49394713 -4.72266324 1.0537116 1.17500451]
[-1.97583185 2.65518859 1.40395621 -1.08331295]
[-2.26674234 4.65542131 -0.41311753 -0.97556144]
[1.68433179 -2.16997478 0.06238666 1.42325633]]

Вектор калібрувальних координат:

[[10. 20.]
[30. 15.]
[50. 25.]
[70. 5.]]

Координати датчиків:

[[28.19546949 31.25680657]
[54.2632432 29.99353231]
[28.05003858 9.29072747]
[54.49135063 9.81296221]]

В нашому випадку розраховані значення координат датчиків становили в сантиметрах:

$X_1=28.20, Y_1 = 31.26;$

$X_2= 54.26, Y_2 = 29.99;$

$X_3= 28.05, Y_3 =9.29;$

$X_4= 54.49, Y_4 =9.81.$

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, проведемо порівняння координат отриманих за допомогою алгоритму та реальними. Порівняльна таблиця представлена нижче (табл. 3.14).

Таблиця 3.14 – Порівняння координат

№ п/п	Реальні координати		Визначенні координати	
	X, см	Y, см	X, см	Y, см
1	28,1	30,8	28,20	31,26
2	54,3	30,5	54,26	29,99
3	28,2	10,3	28,05	9,83
4	54,4	9,5	54,49	9,81

Таким чином відносні похибки (табл. 3.15) визначення координат становлять:

Таблиця 3.15 – Похибки вимірювання

№ п/п	Похибки, %	
	X	Y
1	0,36	1,49
2	-0,07	-1,67
3	-0,53	-4,56
4	0,17	3,26

Звідси можна зробити висновок про те, що отриманні значення задовольняють поставлені межі.

3.6. Проведення вимірювання за розробленим алгоритму

Експериментальні дослідження були проведені в лабораторних умовах в якості вантажу використовувалась гірка номіналом 500 г.

Навантаження прикладались в координатній сітці, яку нанесено на скло, на перетині в точках 1,1; 1,2; 1,3...3,7.

Нижче представлено результати вимірювання в таблиці 3.16, в якій наведено вихідні коди датчиків, виміряне та задане значення координат центру ваги, а також вага.

Таблиця 3.16 – Результати вимірювання

Датчик 1	Датчик 2	Датчик 3	Датчик 4	Виміряні координати		Вага	Задане координати	
				X, см	Y, см		X, см	Y, см
1	2	3	4	5	6	7	8	9
447004	388513	385064	204600	9,98	30,36	499,56	10	30

					МД ПМ81.000.00 ПЗ				Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					71

1	2	3	4	5	6	7	8	9
426980	407318	367566	222947	20,03	30,07	499,31	20	30
406638	427603	351091	239122	29,89	30,01	499,88	30	30
382167	450960	337007	253657	40,16	29,75	499,79	40	30
358206	473994	323350	267622	50,18	29,53	499,88	50	30
337422	495024	307306	282949	60,00	29,55	500,03	60	30
318117	514406	289386	300588	69,91	29,50	500,08	70	30
415068	372152	416347	221059	10,02	20,05	500,28	10	20
396464	390094	397659	240078	19,98	19,89	500,41	20	20
377480	408980	378648	258945	30,16	19,84	500,09	30	20
358780	426801	360011	277911	40,08	19,65	500,10	40	20
340319	444577	341267	296936	50,02	19,49	499,82	50	20
322072	463489	321999	315432	60,03	19,59	500,10	60	20
303790	482050	303126	333479	69,97	19,65	500,14	70	20
382018	356638	448393	236675	10,02	9,73	499,99	10	10
363986	374019	429054	256464	20,05	9,58	500,31	20	10
347673	390405	407372	277641	30,15	9,58	499,60	30	10
334387	403496	384149	301036	39,95	9,53	499,94	40	10
321068	416872	359954	325162	50,01	9,53	500,27	50	10
305808	432522	337678	346750	60,06	9,60	499,72	60	10
288788	450130	317938	365631	69,89	9,71	499,89	70	10

Нижче приведено похибки вимірювання положення центру ваги та загальної ваги вантажу (табл. 3.17).

Таблиця 3.17 – Похибки вимірювання

№ п/п	X	Y	Вага
1	2	3	4
1	-0,0286	1,2000	-0,0880
2	0,0429	0,2333	-0,1380
3	-0,1571	0,0333	-0,0240
4	0,2286	-0,8333	-0,0420
5	0,2571	-1,5667	-0,0240
6	0,0000	-1,5000	0,0060
7	-0,1286	-1,6667	0,0160
8	0,0286	0,1667	0,0560
9	-0,0286	-0,3667	0,0820
10	0,2286	-0,5333	0,0180
11	0,1143	-1,1667	0,0200
12	0,0286	-1,7000	-0,0360
13	0,0429	-1,3667	0,0200
14	-0,0429	-1,1667	0,0280
15	0,0286	-0,9000	-0,0020
16	0,0714	-1,4000	0,0620
17	0,2143	-1,4000	-0,0800
18	-0,0714	-1,5667	-0,0120
19	0,0143	-1,5667	0,0540
20	0,0857	-1,3333	-0,0560

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1	2	3	4
21	-0,1571	-0,9667	-0,0220

3.7. Оцінка адекватності розробленої математичної моделі за результатами дослідження

Створювана математична модель орієнтована на дослідження тому, можна вважати, що ступінь її адекватності залежить від того, як проведенні дослідження.

Оцінку адекватності розробленої математичної моделі пропонується провести за чотирма критеріями:

1) За коефіцієнтами чутливостей датчиків

Реальні коефіцієнти чутливостей тензометричних перетворювачів представлено нижче в грам/код:

$$S_1 = 200,08; S_2 = 192,74; S_3 = 193,13; S_4 = 196,13.$$

А коефіцієнти чутливостей визначенні за допомогою алгоритму відповідно дорівнювали в грам/код:

$$S_1 = 199,88; S_2 = 193,65; S_3 = 192,86; S_4 = 195,76.$$

Таким чином в даному випадку похибки чутливості першого датчика – 0,09%, другого – це 0,44%, для третього – -0,16% і для четвертого -0,38%. Результат задовольняє поставлене завдання.

2) За визначенням координат датчиків

Реальні координати датчиків відносно вантажоприймальної платформи становлять в сантиметрах:

$$X_1 = 28.1, Y_1 = 30.8; X_2 = 54.3, Y_2 = 30.5; X_3 = 28.2, Y_3 = 10.3; X_4 = 54.4, Y_4 = 9.5.$$

Отриманні за допомогою алгоритму становили в сантиметрах:

$$X_1 = 28.20, Y_1 = 31.26; X_2 = 54.26, Y_2 = 29.99; X_3 = 28.05, Y_3 = 9.29; X_4 = 54.49, Y_4 = 9.81.$$

Похибки наведені у таблиці 3.18.

Таблиця 3.18 – Похибки вимірювання

№ п/п	Похибки, %	
	X	Y
1	2	3

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1	2	3
1	0,36	1,49
2	-0,07	-1,67
3	-0,53	-4,56
4	0,17	3,26

Таким чином похибки лежали в діапазоні від -0,53 ...0,36 для X і -4,56 ... 1,49 для Y. Результат задовольняє поставлене завдання.

3) За вимірюванням ваги

Навантаження проводилось гирею номіналом 500 г. Виміряне значення коливалось в межах 499...501 г.

Таким чином похибка вимірювання склала $500 \pm 0,47$. Результат задовольняє поставлене завдання.

4) Вимірюванням положення центру ваги

Відносна похибка лежить в діапазоні при вимірюванні в координаті X – $\pm 0.4 \%$, а Y – $\pm 1.5\%$.

Теоретичний склад похибки вимірювання координат залежить класу точності тензоперетворювачів ваги і та калібрування системи. Математично можна оцінити за виразом:

$$\delta_{dl} = \sqrt{n} \cdot (\delta_{\text{дат.}} + \delta_{\text{калібр.}}),$$

де:

$\delta_{\text{дат.}}$ – похибка датчика;

$\delta_{\text{калібр.}}$ – похибка калібрування.

$$\delta_{dl} = \sqrt{4} \cdot (0.017 + 0.25) = 0,53\%.$$

Після дослідження запропонованої математичної моделі можна зробити висновок, що вона має не лінійний характер. І відхилення лежить в заданих межах. Отже, розроблена модель є адекватною.

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. РОЗРОБКА СТПРТАП-ПРОЕКТУ

«Вимірювальна система визначення координат центру мас»

В даному розділі приведений маркетинговий аналіз проекту магістерської дисертації з метою визначення можливості виходу продукту на ринок та можливих напрямків його реалізації. Аналіз проведений за викладеним алгоритмом в [25].

4.1. Опис ідеї проекту

В таблиці 4.1. представлено зміст ідеї, можливі напрямки застосування та основні вигоди, які може отримати користувач від даного продукту.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка системи, яка дозволить визначати вагу та координати центру мас.	Автомобільний транспорт	1. Безпека 2. Збільшення міжремонтних пробігів
	Залізничний транспорт	1. Безпека 2. Підвищення швидкості 3. Збільшення міжремонтних пробігів
	Авіатранспорт	1. Безпека

Отже, пропонована вимірювальна система визначення координат центру мас та ваги, дозволить контролювати вимоги правил перевезення вантажів для вище вказаного транспорту з метою забезпечення безпеки руху.

Наступним проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї, чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників, порівняно із пропозиціями конкурентів.

Визначимо:

- Перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- Попереднє коло конкурентів або товарів-замінників чи аналогів, що існують на ринку;
- Порівняльний аналіз показників.

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко- економічні характерис- тики ідеї	Товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтра льна сторона)	S (сильн а сторон а)
		Мій проект	УВК	Техно- ваги	КВЗ			
1	Точність	Висока	Не достатня	Не достатня	Не достатня			+
2	Простота процесу калібрування	Висока	Середня	Середня	Середня			+
3	Алгоритм визначення координат центру мас	Висока	Низька	Низька	Низька			+
4	Швидка модернізація ваг до заявле- них харак- теристик	Висока	Низька	Низька	Низька		+	

Приведений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару показав, що продукт володіє значними перевагами перед потенційними конкурентними компаніями.

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

В даному підрозділі проводимо аудит технології за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту. Аналіз складових здійсненності ідеї проекту представлено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	2	3	4	5
1	Визначення ваги	Технологія планування виробництвом	Наявна	Складно доступна
2	Визначення координат центру ваги	Технологія планування виробництвом	Наявна	Складно доступна
3	Легка модернізація ваг до заявлених характеристик	Технологія планування виробництвом	Наявна	Доступна

1	2	3	4	5
4	Технічне обслуговування ваг	Технологія планування виробництвом	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Технологія “Шести сигм”				

Технологія “Шести сигм”: Визначення – Вимірювання – Аналіз – Покращення – Контроль (ВВАПК). Яка передбачає розділення проекту на етапи, при цьому кожний із етапів якісно відрізняється від інших та перехід до наступного можливий тільки після ефективного виконання попереднього. Рішення про початок кожного етапу приймається керівництвом після підтвердження економічної і технічної доцільності. Таким чином це дозволить своєчасно корегувати діяльність в проекті та дозволить уникнути інерційних дій та затрат ресурсів.

За проведеним аналізом можна зробити висновок, що цей продукт можна реалізувати, оскільки існують всі необхідні технології для реалізації даних ідей, але є складно доступність технологій, оскільки для запуску у виробництво необхідна велика сума.

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В даному підрозділі проводиться аналіз ринкових можливостей, що можна використати під час ринкового впровадження проекту та ринкових загроз, які можуть перешкоджати реалізації проекту. Проведений аналіз дозволить спланувати напрямки розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Проведений аналіз попиту представлено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показник стану ринку (найменування)	Характеристика
1	2	3
1	Кількість головних гравців, од	6
2	Загальний обсяг продаж, грн./ум.од.	5000000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає

1	2	3
4	Наявність обмежень для входу	Конкуренція існуючих вагових компаній
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ДСТУ 3647-97 Ваги та дозатори вагові. Терміни та визначення
6	Середня норма рентабельності в галузі, %	30%

За попередніми оцінками ринок має зростаючу динаміку і достатній попит на запропонований продукт, таким чином можна зробити висновок, що продукт може вийти на ринок хоча має конкурентів, але завдяки підвищеним показникам точності, простоти вводу в експлуатацію та експлуатацію та новому алгоритму роботи стане конкурентоспроможним.

Далі визначимо потенційні групи клієнтів, їх характеристики та сформуємо перелік вимог до товару для кожної групи (таблиця 4.5).

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартам-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Безпека руху транспортного засобу	Компанії, що займаються перевезеннями залізничним, автомобільним та авіатранспортом (логістичні компанії)	- Doc 9760 AN/967. The Airworthiness Manual; - Інструкція про порядок застосування засобів ваговимірювальної техніки на залізничному транспорті України.	- до продукції: система повинна забезпечувати достовірність та точність результатів; - до компанії: виконання точно заявлених характеристик товару

Отже, потенційною групою споживачі повинні стати компанії, що займаються перевезеннями, з метою забезпечити безпеку руху свого транспорту.

Після визначення потенційних груп клієнтів проводимо аналіз ринкового середовища (табл. 4.6 та табл. 4.7).

Таблиця 4.6 – Фактори загрози

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Поява аналогів	Доведення на практиці, що продукт володіє кращими характеристиками та можливостями ніж у конкурентів
2	Відсутність попиту	Не бажання компаній переходити на новий продукт	Доведення до споживачів інформації про переваги використання та простоту переходу
3	Обслуговування	Ймовірність збоїв при роботі системи	Своєчасна технічна підтримка

Таким чином в таблиці 4.6 визначили фактори загрози, які перешкоджають ринковому впровадженню продукту та можливу реакцію на них.

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Науково-технічні	Технології виготовлення	Впровадження нової технології з метою знизити ціну продукту
2	Політико правові	Підвищення попиту на продукт	Нарощення виробництва
3	Розробка інформативно сайту	Підвищити інтерес до продукту та можливе збільшення попиту	Залучення нових клієнтів

Отже, в таблиці 4.7 визначили фактори можливостей, що впливають на продукти при вході на ринок.

Далі проводимо аналіз пропозиції (табл. 4.8), визначивши загальні риси конкуренції на ринку.

Таблиця 4.8 – Структурний аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Олігополія	В даній галузі домінує 8 компаній дві з яких виробляють значну долю продукції	Випуск продукції із поліпшеними технічними характеристиками
2. Національний	Великою кількістю пропозицій компаній	Реклама товару
3. Міжгалузева	Виробники виготовляють продукти, які задовольняють різні потреби	Розробка та впровадження продукту в нові галузі застосування
4. Товарно-видова	Різноманітність товарів в залежності від потреби	Розробка нового підходу до продукту
5. Цінова	Використання цін як засіб збуту	Підвищення якості продукту за такої ж ціни
6. Марочна	Диференціація продукції підприємств, що дає змогу управляти рівнем доданої вартості	Створення свого власно фірмово ім'я, фірмово знаку та товарного знаку

Після аналізу конкуренції проводимо більш детальний аналіз (табл. 4.9) умов конкуренції в галузі за М. Портером.

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	ТОВ «Техноваги» ТОВ «КВЗ»	Великий асортимент товарів	Значення розміру поставок, диференціація витрат	Обсяг замовлення	Ціна
Висновки:	Середня інтенсивність	Можливість є; Присутні	Не диктують	Диктують	Невеликі

Далі на основі аналізу конкуренції проведеного в таблиці 3.9, а також із урахуванням ідеї проекту в таблиці 4.2, вимоги споживачів до товару в таблиці 3.5 та факторі маркетингового середовища в таблицях 4.6 та 4.7 визначимо та обґрунтуємо перелік факторів конкурентоспроможності (табл. 4.10).

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	2	3
1	Надійність	Більш вища надійність продукту, ніж у конкурентів

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		

1	2	3
2	Ціновий	Опрацювання відгуків клієнтів, вдосконалення відповідно до їх пропозицій та за можливості зниження ціни на продукт.
3	Новизна	Новий алгоритм дозволяє продукту стати конкурентоспроможними на ринку
4	Зручність	Швидке переобладнання вже існуючих ваг до заявлених характеристик

На основі проведеного аналізу провели визначення та обґрунтування факторі конкурентоспроможності даного продукту.

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «вимірювальної системи визначення координат центру мас».

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з ТОВ «Вангар»						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Надійність	17						+	
2	Ціна	18							+
3	Новизна	15					+		
4	Зручність	16							+

Порівняльний аналіз (табл. 4.11) сильних та слабких сторін показав, що продукт має перевагою серед конкурентів – зручність у переобладнанні вже існуючих ваг до заявлених характеристик та володіє більш низькою ціною.

На фінальному етапі ринкового аналізу складаємо SWOT-аналізу (табл. 4.12).

Таблиця 4.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - кращий алгоритм визначення параметрів координат центру мас; - простіші у введенні у експлуатацію; - легко модернізувати вже існуючий продукт до заявлених характеристик; - володіють високою достовірністю; - більш вища якість. 	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - продукт мало відомий на ринку; - на ринку присутні велика кількість компаній, що пропонують схожий продукт; -
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> - отримання державних замовлень на закупівлю та переобладнання існуючого продукту; - розширення ринку за рахунок іноземних замовників; - отримання нових постійних партнерів. 	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> - не готовність - поява якісніших технологій у конкурентів; - зменшення продажів через несвоєчасне виконання замовлень.

В таблиці 4.12 наведено перелік ринкових загроз та ринкових можливостей на основі факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками впливу факторів і на відміну від них, ще не реалізовані на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

Далі на основі SWOT-аналіз стартап-проекту розробляємо альтернативи ринкової поведінки (табл. 4.13).

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Висока	8 місяців
2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	Висока	12 місяців

4.4. Розробка ринкової стратегії проекту

Після розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку, шляхом опису цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.14).

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Державні підприємства	Готові	Середній	Середня	Складна
2	Приватні підприємства	Готові	Середній	Середня	Складна
Які цільові державні та приватні підприємства. Використовується стратегія диференційованого групи обрано: маркетингу.					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів було обрано державні та приватні підприємства для яких буде запропонована програма переходу на вимірювальну систему визначення координат центру мас. За стратегію охоплення ринку було обрано стратегію диференційованого

маркетингу, оскільки компанія працюватиме із кількома сегментами, розробляючи для них окремо програми ринкового впливу.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформуванати базову стратегію розвитку (табл. 4.15) та стратегію конкурентної поведінки (табл. 4.16).

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Підсилення сильних сторін стартапу за рахунок ринкових можливостей	Передбачає надання товару важливого з точки зору споживача властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів	Ціна така, як і у конкурентів	Стратегія диференціації

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Проект не є «першопрохідцем»	Компанія буде забирати існуючих споживачів у конкурентів	Не буде копіювати основні характеристики програми конкурента	Стратегія зайняття конкурентної ніші

Отже, для ефективної роботи в сегменті ринку було обрано: за базову стратегії розвитку – стратегія диференціації, передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмінних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів, а за базову стратегію конкурентної поведінки – стратегію зайняття конкурентної ніші, оскільки компанія працюватиме в декількох ринкових сегментах. Головними при цьому завданнями для компанії є: залишатись стабільною в продовж часу, бути досить прибутковою, щоб робити доцільним процес виробництва та обслуговування.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та конкурентної поведінки розробляємо стратегію позиціонування (табл. 4.17).

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Висока ефективність, ціна	Стратегія диференціації	Краща якість ніж у конкурентів за такою ж ціною	Надійність Стабільність Точність

Таким чином компанія працюватиме за диференційною стратегією розвитку та стратегією зайняття конкурентної ніші, в якості цільової групи було обрано державні та приватні підприємства, ринок готовий сприйняти товар та має складність виходу на ринок, оскільки на ринку присутня велика кількість конкурентів, готовність споживачів сприйняти товар – високий та інтенсивність конкуренції в сегментів – середня.

4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком при розробленні маркетингової програми є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач, для цього потрібно підсумувати результати аналізу конкурентоспроможності товару (4.18).

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Потреба програмному забезпеченні	Контроль вимог правильності завантаження вантажів з метою безпеки руху на шляхах прямування	Постійна технічна підтримка та оновлення. Вдосконалення алгоритму роботи та вдосконалення системи. Вдосконалення програмного забезпечення

Далі розробляємо трьохрівневу маркетингову модель товару: уточнюється ідея продукту його фізичні складові, особливості процесу його роботи (табл. 4.19).

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Система визначення координат центру мас та ваги Можна виділити наступні вигоди використання: - забезпечення безпеки пересування вантажів; - збільшення часу між ремонтними пробігами; - підвищення швидкості.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Економічні	Нм	Вр
	2. Призначення	Нм	Тх
	3. Надійність	М	Тл
	4. Технологічні	М	Тх
	5. Транспортабельності	М	Тх
	6. Безпеки	М	Тх
	Якість: Відповідає нормам ГОСТ 2.307-2011 «Виготовлення і складання виробів»		
	Пакування: Картонна коробка із торгівельною маркою, назвою продукту і технічними характеристиками		
Марка: назва організації-розробника			
III. Товар із підкріпленням	Розповсюдження реклами		
	Акція, яка передбачає придбати кілька продуктів за зниженою ціною		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Захист інтелектуальної власності, патент на винахід.			

В таблиці 4.19 розробили трьохрівневу модель, що відображає задум товару та його можливості при використанні, основні характеристики готового товару, спосіб пакування та захист від копіювання та плагіату. Слід зауважити захист від копіювання буде захищено патентом на винахід.

Наступним кроком є встановлення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на товар на основі аналізу на товари-аналоги або товари субститути, а також на аналізі рівня доходів цільової групи споживачі (табл. 4.20).

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення цін

№ п/п	Рівень цін на товари замітники	Рівень цін на товари аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	500000 грн.	700000 грн.	Середній	500000 – 700000 грн.

В таблиці 4.20 було проаналізовано ринкові ціни на товари аналоги та замітники, а також середній рівень доходів споживачів. За проведеним аналізом прийняте рішення встановити верхню межу ціни на продукт.

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту в межах якого приймається рішення (табл. 4.21).

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Звична купівля з деяким змінами, або модифікована закупівля. Вона передбачає придбання дещо змінених товарів (послуг), або зміну ціни на товар (послугу), або зміну кількості постачання).	Доставка продукту покупцю, його встановлення та налаштування.	Канал нульового рівня	Власна система збуту. Виробник безпосередньо продає товар клієнту і використовує торгівлю через власний сайт (інтернет-магазин).

І нарешті останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій. В результаті буде розроблена ринкова програма, що включатиме в себе концепції товару, збуту, просування та попередній аналіз можливостей ціноутворення (табл. 4.22).

Таблиця 4.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Перегляд інформаційний ресурсів із потрібним якісним товаром за доступною ціною.	Інтернет ресурси, виставки.	Послідовність у реалізації обраної позиції. Доступність та об'єктивність інформації про фірму та товар. Послідовність при прийнятті рішень.	Інформаційне завдання про новий товар, та формування знань про марку та виробника.	Висока якість і швидке налаштування системи.

Висновки

Ринкова комерціалізація проекту є невід'ємною частиною створення нового продукту. Даний продукт не для широкого загалу, а орієнтований на державні та приватні підприємства. Із сторони державних підприємств (структур) спостерігається достатньо високий попит на продукт, оскільки на це впливають розроблені правила, що регулюють перевезення вантажів. Слід також зазначити, що динаміка ринку та рентабельність роботи на ринку достатньо високі, що є позитивним для розгортання діяльності.

Даний проект буде реалізовуватись за технологією “Шести сигм”. При використанні даної технології реалізації проектів в декілька раз зменшується час та вартість виконання задач, значно підвищується ймовірність досягнення необхідного результату.

Розглянувши специфіку закупівельної поведінки цільових клієнтів, слід зазначити добрі перспективи впровадження даного продукту на ринок, про те наявний достатньо високий бар'єр входу, оскільки існує достатня кількість товарів замінників, але в порівнянні дана система забезпечує більш високу точність та достовірність, простоту в переобладнанні вже існуючих ваг до заявлених характеристик.

Для впровадження продукту на ринок було обрано стратегію зайняття конкурентної ніші, коли компанія в якості цільового ринку вибирає один або декілька ринкових сегментів.

Отже, подальша імплементація продукту є доцільною за рахунок сильних сторін продукту та наявного попиту на ринку.

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На підставі проведеної роботи можна зробити наступні висновки.

Безпека руху поїздів і збереження вантажів, які перевозять, безпосередньо залежать від способу розміщення у вагоні вантажу та його кріплення, тому слід особливу увагу приділяти центру ваги. Для стійкості вагону й безпеки транспортування центр ваги повинен розташовуватись на перетині центральних та поздовжніх ліній.

Для контролю центру ваги була запропонована система вимірювання положення центру ваги. Робота системи здійснюється за алгоритмом, що базується на розробленій математичній моделі. Для перевірки та проведення досліджень роботи математичної моделі було розроблено програмний продукт для читання інформації, її обробки та візуального представлення.

Були проведенні експериментальні дослідження по визначенню чутливостей при різних положеннях калібрувального навантаження та визначення координат розташування тензометричних ваговимірювальних перетворювачів та порівнянні з істинними значеннями. При цьому результати відносних похибок лежали в діапазоні $\pm 0,5\%$. Проведено дослідження вимірювання ваги та координат положення центру ваги. Результати показали що дана система вимірювання відповідає поставленому технічному завданню оскільки вписується в діапазон вимірювань ± 5 мм координат та ваги $0,5\%$. За результатами оцінки адекватності розробленої математичної моделі, можна зробити висновок, що розроблена математична модель вимірювання положення центру ваги є адекватною.

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Анисимов П. С. Безопасность движения открытого подвижного состава при несимметричном размещении тяжеловесных и крупногабаритных грузов: Дис. д-ра техн. наук / П. С. Анисимов. М.: МИИТ, 1988. – 608 с.
2. Анисимов, П.С. Оценка устойчивости колеса на рельсе при поперечном смещении центра массы тяжеловесного груза / П. С. Анисимов // Тез. докл. 3-й научн.-практ. конф. «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте». М.: МИИТ, 2001. – С. IV-5.
3. Вериго, М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М.Ф. Вериго, А.Я. Коган. Под ред. М. Ф. Вериго. М.: Транспорт, 1986. – 559 с.
4. Шахуньянц, Г. М. Железнодорожный путь: Учебник для вузов ж.-д. трансп. / Г.М. Шахуньянц. М.: Транспорт, 1987. – 479 с.
5. Расчёты и проектирование железнодорожного пути: Учебное пособие для студентов вузов ж. – д. трансп. / В.В. Виноградов, А.М. Никонов, Т. Г. Яковлева и др.; Под ред. В. В. Виноградова и А.М. Никонова. М.: Маршрут, 2003. – 486 с.
6. Туранов, Х.Т. Математическое моделирование рамных сил при движении подвижного состава с несимметрично размещённым грузом / Х. Т. Туранов, А.Р. Якупов // Транспорт Урала, 2011, № 2. – С. 47–51.
7. Расчётные нагрузки для осей колёсных пар / <http://www.bmvit.gv.at>, <http://www.oevg.at> // Железные дороги мира. – 2011. – № 2. – С. 36–40.
8. Туранов, Х. Т. Математическое моделирование сдвига груза при движении подвижного состава по кривому участку пути с учётом воздействия пространственной системы сил, включая силы инерции Кориолиса / Х. Т. Туранов, Е. Н. Тимухина // Транспорт: Наука, техника и управление. – 2011. – № 3. – С. 28–32.
9. Приложение 14 к СМГС «Правила размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах». М.: Планета, 2005. – 191 с.
10. Лойцянский, Л. Г. Курс теоретической механики. Т. II. Динамика / Л.Г. Лойцянский, А. И.Лурье. М.: Наука, 1983. – 640 с.

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11. Бухгольц, Н. Н. Основной курс теоретической механики / Н. Н. Бухгольц. М.: Наука, 1967. Ч. I. – 460 с.
12. Туранов Х.Т., Тимухина Е. Н., Даусеитов Е. Б. Аналитическое обоснование технологии креплений при несимметричном размещении общего центра масс грузов в вагонах / Транспорт: Наука, техника и управление, 2009, № 7. – С. 28–32.
13. Туранов Х.Т., Тимухина Е. Н., Даусеитов Е. Б., Кравченко О. А. Численное обоснование технологии несимметричного размещения общего центра масс грузов в вагонах / Транспорт: Наука, техника и управление, 2009, № 3. – С. 11-15.
14. Туранов, Х. Т. Теоретическая механика в задачах грузовых перевозок: монография / Х. Т. Туранов. Новосибирск: Наука СО РАН, 2009. – 376 с.
15. Швець А. О. Вплив поздовжнього та поперечного зміщення центру ваги вантажу в піввагонах на їх динамічні показники [Текст] // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту – 2018. - № 5. – С. 115-128.
16. Патент 116123 UA, МПК (2017.01) G01G 19/00, G01G 19/04 (2006.01) Ваги вагонні з цифровими датчиками з визначенням відхилення центру тяжіння вагона / Бугаєнко Г. Я., Бугаєнко Є. Г. ; заявник Бугаєнко Георгій Якович, Бугаєнко Єгор Георгійович. — № u 2016 11505; заявл. 14.11.2016 ; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9, 2017 р.
17. Романов А. Н. Определение смещение центра тяжести груза в железнодорожном вагоне / А. Н. Романов, Ф. И. Гиревка, Д. Г. Заворотный // ПИКАД – 2007. – № 3. — С. 34-35.
18. Збірник № 17 Правил перевезення і тарифів залізничного транспорту України. – Київ : САМ, 2005. – 176 с.
19. What is OASES? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.commssoft.co.uk/system/>.

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

20. Type L6D Load Cell [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.zemiceurope.com/media/Documentation/L6D_Datasheet.pdf.

21. Цифровой электронный усилитель сигнала от тензодатчиков AD105C [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dl-kinesis.by/p26284-tsifrovoj-elektronnyj-usilitel.html>.

22. RS-485 для чайников [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://masters.donntu.org/2004/fema/kovalenko/library/art7.html>.

23. Описание RS-485, RS-422 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://vkmodule.com.ua/Description/Description2.html>.

24. Конвертер изолированный КИМ-USB-RS485_КМКС [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.km-cs.com>.

25. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

26. Тимухина, Е.Н. Математическое моделирование нагруженности колёсной пары вагона с несимметрично размещённым грузом при воздействии пространственной системы сил [Текст] / Якупов А.Р. // ВИНТИ ТРАНСПОРТ НАУКА, ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ НАУЧНЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ СБОРНИК. – 2011. - №7, – С. 15-19.

27. Магістерська дисертація: організація, вимоги до структури, змісту та оформлення [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра за освітньо-професійними програмами спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О. К. Нікітін, В. М. Зайцев. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,09 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 106 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30397>.

28. Приладобудування та автоматизація. Терміни і визначення. Ч.1 [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студ. спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітня програма

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						92
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

29. " " /
 " " "T" " " " "
 " " " " / " "
 « : " » "110- " « » :
 " .23 "2008 " " "T" "« », 0–
 " "« », 2008. – 061. URL :
<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30896>

					<div style="text-align: center;"> <p>МД ПМ81.0000.00 ПЗ</p> </div>	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А

Код програми, яка побудована за розробленим алгоритмом:

```
import sys
import numpy as np
from tkinter import *
from responde_device import *
from tkinter import messagebox as mb
from operation import *

# Міксин для читання
def read_data(filename):
    result_list = []
    with open(filename, "r") as file:
        for line in file:
            result_list.append(float(line))
    return result_list

flag = True
point = 1
# Координати колибрувального вантажу
coordinatesSet = []
# Матриця кодів для обрахунку
matrixCodes = []
# Коди нулів
zero_mass = []

# Коефіцієнт градування датчиків (чутливість)
coefficients_A = [200.0802361, 192.7845569, 193.170005,
196.5065212]

# ФУНКЦІЇ ДЛЯ ОБРОБКИ ПОДІЇ
# Обчислення даних із датчиків
def giver():
    # Коди нульового вантажу
    zeroCodes = read_data('configuration/zerodata.txt')

    # Координати датчиків
    coordinates_devices =
read_data('configuration/coordinates.txt')
    coordinates_devices =
np.array(coordinates_devices).reshape(4,2)

    if flag == True:
        response = get_response()
        R1 = ((float(response['response_devisе_#1']) -
zeroCodes[0])/coefficients_A[0])
        R2 = ((float(response['response_devisе_#2']) -
zeroCodes[1])/coefficients_A[1])
        R3 = ((float(response['response_devisе_#3']) -
zeroCodes[2])/coefficients_A[2])
        R4 = ((float(response['response_devisе_#4']) -
zeroCodes[3])/coefficients_A[3])
```

					МД ПМ81.000.00 ПЗ	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

# Загальна вага
SUM_force = R1 + R2 + R3 + R4

# Координати центру ваги
X0 =
((R1/SUM_force)*coordinates_devices[0][0])+((R2/SUM_force)*coordinates_devices[1][0])+((R3/SUM_force)*coordinates_devices[2][0])+((R4/SUM_force)*coordinates_devices[3][0])
Y0 =
((R1/SUM_force)*coordinates_devices[0][1])+((R2/SUM_force)*coordinates_devices[1][1])+((R3/SUM_force)*coordinates_devices[2][1])+((R4/SUM_force)*coordinates_devices[3][1])

# Вивід даних
coordinatesResult = f'X = {X0:.2f}; Y = {Y0:.2f}'
resultMass = f'Mass = {round(SUM_force)} g'

labelCoordinates.config(text=coordinatesResult)
labelMass.config(text=resultMass)

# функція after забезпечує оновлюваність даних у вікні із частотою 200 мілі секунд
labelCoordinates.after(200, giver)
# labelMass.config(text=resultMass)

# Бере нуль
def getZero():
    answer = mb.askyesno(title="Get zero", message="Put away everything from scales!")
    if answer == True:
        response = get_response()
        with open("configuration/zerodata.txt", "w") as file:
            for i in range(4):

file.write(str(response[f'response_device_{i+1}']))
            file.write('\n')

# Закриття програми
def closeProgram():
    sys.exit()

# Продовження роботи ваг
def refresh():
    global flag
    flag = True

# Вікно калібрування
def makeCalibrationWindow():
    global point
    point = 1

# Бере дані про ноль для обрахунку
def makeZero():
    response = get_response()
    for j in range(4):

```

```

zero_mass.append(float(response[f'response_devide_{j+1}']))
    labelHint.config(text='Поставте калібрувальну вагу в
точку №1. \n Введіть відповідно координати та натисніть
"Apply".')
# Робить зчитування
    def getCalibration():
        x = entryX.get()
        y = entryY.get()

        if x != '' and y != '' and len(coordinatesSet) / 2 != 4:
            coordinatesSet.append(float(x))
            coordinatesSet.append(float(y))
            calibrationResponse = get_response()
            for j in range(4):

matrixCodes.append(float(calibrationResponse[f'response_devide_{j+1}']))
        else:
            mb.showinfo("Hint", 'Ви ввели не вірні дані!')

            entryX.delete(0, END)
            entryY.delete(0, END)

            if len(coordinatesSet) / 2 < 4 and x != '' and y != '' :
                global point
                point += 1
                labelHint.config(text=f'Поставте калібрувальну вагу в
точку №{point}. \n Введіть відповідно координати та натисніть
"Apply".')
                if len(coordinatesSet) / 2 == 4:
                    mb.showinfo("Hint!", 'Всі точки додано. Натисніть
"Get and Save" для обрахунку координат.')

# Робить обрахунок координат датчиків та зберігає в конфіг файл
    def saveData():
        a = np.array(matrixCodes)
        a = a.reshape((4, 4))
        aMinusVector = matrixMinusVector(a, zero_mass)

        aDevideVector = matrixDevideVector(aMinusVector,
coefficients_A)

        setReac = creatSumArray(aDevideVector)

        normMatrix = normalization(aDevideVector, setReac)

        m = np.matrix(normMatrix)
        newM = m.I

        coordinates = np.array(coordinatesSet)
        coordinates = np.matrix(coordinates.reshape(4, 2))

        coordinatesLoadCells = newM.dot(coordinates)

```



```

write_data('coordinates.txt', np.array(coordinatesLoadCells))
    print(coordinatesLoadCells)
    mb.showinfo("Hint", 'Дані обраховано та збережено
    успішно!')

# Опис графічного інтерфесу вікна калібрування
    global flag
    flag = False
    top = Toplevel(root)
    top.title("Calibration")

    labelHint = Label(top, font="Arial 14", text="Приберіть все з
    вар! \n Натисніть 'Zero' для того, щоб взяти нуль. ", fg="#fff",
    bg="#333", width=45, height=3)
    labelHint.grid(row=1, column=1, columnspan=3)

    labelX = Label(top, font="Arial 14", text="X")
    labelX.grid(row=2, column=1)
    labelY = Label(top, font="Arial 14", text="Y")
    labelY.grid(row=2, column=3)

    entryX = Entry(top)
    entryX.grid(row=3, column=1)

    entryY = Entry(top)
    entryY.grid(row=3, column=3)

    buttonMake = Button(top, text='Apply', fg="#fff", bg="#333",
    command=getCalibration)
    buttonMake.grid(row=4, column=1, ipadx=10, ipady=6, padx=10,
    pady=20)

    buttonZero = Button(top, text='Zero', fg="#fff", bg="#333",
    command=makeZero)
    buttonZero.grid(row=4, column=2, ipadx=10, ipady=6, padx=10,
    pady=20)

    buttonSave = Button(top, text='Get and Save', fg="#fff",
    bg="#333", command=saveData)
    buttonSave.grid(row=4, column=3, ipadx=10, ipady=6, padx=10,
    pady=20)

    width_root = 495
    height_root = 195

    w = (root.winfo_screenwidth() // 2) - (width_root // 2)
    h = (root.winfo_screenheight() // 2) - (height_root // 2)
    top.geometry(f"{width_root}x{height_root}+{w}+{h}")
    # top.geometry("450x165+800+400")
    top.resizable(False, False)
    top.grab_set()
    top.focus_set()
    top.wait_window()

```

```

# Графічний інтерфейс головного вікна
root = Tk()
root.title('ScalesApp')
width_root = 476
height_root = 175

w = (root.winfo_screenwidth() // 2) - (width_root // 2)
h = (root.winfo_screenheight() // 2) - (height_root // 2)
root.geometry(f"{width_root}x{height_root}+{w}+{h}")
root.resizable(False, False)

#333
labelCoordinates = Label(font=("Arial", 32), fg="#eee",
bg="#333", width=18, height=2)
labelCoordinates.grid(row=1, column=1, padx=10, pady=10)

labelMass = Label(font="Arial 20", fg="#eee", bg="#333")
labelMass.grid(row=2, column=1, sticky="e", padx=10)

# Опис меню
main_menu = Menu()

ScalesAppMenu = Menu()
ScalesAppMenu.add_command(label="Calibration",
command=makeCalibrationWindow)
ScalesAppMenu.add_command(label="Get zero", command=getZero)
ScalesAppMenu.add_command(label="Refresh", command=refresh)
ScalesAppMenu.add_separator()
ScalesAppMenu.add_command(label="Exit", command=closeProgram)

helpMenu = Menu()
helpMenu.add_command(label="Quick start")
helpMenu.add_command(label="About program")

main_menu.add_cascade(label="ScalesApp", menu=ScalesAppMenu)
main_menu.add_cascade(label="Help", menu=helpMenu)

root.config(menu=main_menu)

# Виклик функції
giver()

root.mainloop()

```